

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

# **Vliv materiálu extruderu 3D tiskárny na kvalitu 3D tisku**

## **Influence of 3D Printer Extruder Material on 3D Printing Quality**

Bakalářská práce

Student:	Marek Siwek
Osobní číslo	SIW0008
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Siwek**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Vliv materiálu extruderu 3D tiskárny na kvalitu 3D tisku**  
**Influence of 3D Printer Extruder Material on 3D Printing Quality**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky 3D tisku.
3. Návrh experimentu.
4. Realizace, dílčí hodnocení.
5. Závěr.

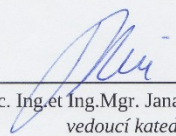
Seznam doporučené odborné literatury:


GIBSON, I., D. W ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.  
KOZIOR T.; KUNDER C. *Evaluation of the Influence of Parameters of FDM Technology on the Selected Mechanical Properties of Models*, In *Procedia Engineering*, Volume 192, 2017, Pages 463-468.  
BATEMAN, Rob a Richard OLSSON. *The essential guide to 3D in Flash*. Berkeley. California: Friends of Ed, [2010]. ISBN 978-1-4302-2542-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019  
Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

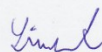
  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.

Podpis studenta

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SIWEK, Marek. Vliv materiálu extruderu 3D tiskárny na kvalitu 3D tisku. Ostrava, 2020. Bakalářská práce. VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vedoucí práce Jiří Kratochvíl.

Práce se zabývá vlivem materiálu extruderu 3D tiskárny na kvalitu výsledného výrobku. Experiment byl prováděn na tiskárně Anet A2 s mosaznou, ocelovou a titanovou tryskou identických rozměrů. Jako hlavní hodnotící kritéria vytisknutého modelu byla stanovena rozměrová a tvarová přesnost, vzhled a také opotřebení trysky. Měření kritérii bylo prováděno především mikroskopem INTRACO MICRO. Hodnocení naměřených hodnot ukázalo na významné rozdíly mezi materiály trysek. Při finalním vyhodnocení kvality po tisku byly zjištěny, popsány a vyhodnoceny různé výhody a nevýhody použitých materiálů trysek.

Klíčová slova:

3D tisk; extruder; tryska; Anet A2; filament; kvalita.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SIWEK, Marek. Influence of 3D Printer Extruder Material on 3D Printing Quality. Ostrava, 2020. Bachelor Thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of machining, assembly and engineering metrology. Thesis supervisor: Jiří Kratochvíl.

The bachelor thesis analyzes the influence of the material of the 3D printer extruder on the quality of the final product. The experiment was carried out 3D printer Anet A2 with a brass, steel, and titanium nozzle of identical dimensions. Dimensional and shape accuracy, appearance, and also nozzle wear was determined as the main evaluation criteria of the printed model. The measurement criteria were mainly measured with an INTRACO MICRO microscope. The evaluation of the measured values showed significant differences between the nozzle materials. During the final evaluation of the quality after printing, various advantages and disadvantages of the used nozzle materials were identified, described, and evaluated.

Keywords:

3D printing; extruder; nozzle; Anet A2; filament; quality.

## OBSAH

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
Úvod .....	9
1 Teoretický rozbor problematiky 3D tisku .....	10
1.1 Princip a použití aditivní technologie .....	10
1.2 Historie a začátky technologií 3D tisku .....	10
1.3 Typy řízení FDM tiskáren .....	17
1.3.1 FDM tiskárna s kartézským systémem .....	17
1.3.2 Core XY .....	18
1.3.3 Delta .....	18
1.3.4 Polar .....	19
1.3.5 Scara .....	20
1.4 Materiály používané při 3D tisku metodou FDM .....	21
1.4.1 ABS .....	22
1.4.2 PLA .....	22
1.4.3 PA .....	23
1.4.4 PC .....	23
1.4.5 PVA .....	23
1.4.6 PEI .....	24
1.4.7 PET-G .....	24
2 Návrh experimentu .....	25
2.1 Vytvoření 3D modelu v modeláři .....	25
2.2 Výběr vhodného softwaru pro přípravu před 3D tiskem .....	26
2.3 Instalace programu na přípravu před 3D tiskem .....	26
2.4 Nastavení parametrů před 3D tiskem .....	27
2.4.1 Výška vrstvy .....	27
2.4.2 Tloušťka skořepiny .....	27

2.4.3	Retrakce struny .....	28
2.4.4	Výška spodní a horní vrstvy modelu .....	29
2.4.5	Výplň modelu .....	29
2.4.6	Použité rychlosti při tisku .....	30
2.4.7	Použitý tiskový materiál .....	32
2.4.8	Teplota vyhřívané podložky .....	32
2.4.9	Teplota extruderu.....	33
2.4.10	Použité trysky .....	33
2.5	Výběr vhodné tiskárny .....	35
3	Realizace experimentu.....	36
3.1	Prostředí při 3D tisku .....	36
3.2	Pracovní pomůcky použité při tisku .....	36
3.3	Tisk modelů .....	37
3.3.1	Vady v průběhu tisku.....	38
4	Dílčí hodnocení dosažených výsledků .....	42
4.1	Vizuální hodnocení modelů .....	42
4.2	Hodnocení rozměrové přesnosti tisku.....	44
4.3	Měření opotřebení trysek po tisku .....	49
5	Závěr.....	52
6	Poděkování .....	53
7	Seznam použitých zdrojů .....	54
8	Seznam obrázků.....	57
9	Seznam příloh .....	59

## **Seznam použitých zkratk a symbolů**

3D	Three-dimensional
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
BJ	Binder Jetting
BPM	Ballistic Particle Manufacturing
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LOM	Laminated Object Manufacturing
PA	Polyamid
PC	Polycarbonates
PEI	Polyetherimid
PET	Polyethylene Terephthalate
PET-G	Polyethylene Terephthalate Glycol
PLA	Polylactic Acid
PVA	Polyvinyl Alcohol
SHS	Selective Heat Sintering
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
UV	Ultraviolet
WPC	Wood Plastic Copolymer



## Úvod

Tato práce je zaměřena na to, jak se mění kvalita tisku za použití různých materiálů extruderu 3D tiskárny. Účelem práce je zjistit, zda změna trysky za jinou trysku identických rozměrů, avšak z jiného materiálu, má nějaký vliv na to, jak se bude tištěný výrobek chovat v průběhu tisku, a hlavně na to, jaké budou jeho rozměry v porovnání s ostatními výrobky za použití trysky z jiného materiálu. Hodnocena bude rovněž vizuální stránka, anebo vady objevující se v průběhu tisku. Posledním hodnoceným parametrem bude opotřebení každé trysky po vytisknutí všech modelů. Důvodem, proč se tento experiment provádí, jsou rovněž rychle se rozvíjející moderní technologie obrábění. Je třeba zjistit, zda lze na 3D tiskárně docílit srovnatelné kvality oproti ostatním technologiím (vodní paprsek, vysokorychlostní obrábění, elektroerozivní obrábění atd).

Úvodní část této práce bude obsahovat teoretický rozbor problematiky 3D tisku. Obecně lze zcela určitě říct, že 3D tisk je v dnešní době velice populární a rychle se rozvíjející obor, který nachází uplatnění v mnoha oblastech strojírenství, zdravotnictví nebo v automobilovém průmyslu. Budou rovněž popsány základní metody a rozdělení 3D tisku, jak se která metoda odlišuje od ostatních, nebo také různé vady, na které by bylo možno v průběhu tisku jednotlivých vzorků narazit.

Následující část, již bude zaměřena na návrh samotného experimentu. Bude se nejspíš jednat o jednoduchý tvar, na kterém se budou nacházet různé geometrické útvary, které poslouží k tomu, aby bylo poté možno provést měření a vizuální kontrolu a porovnat jednotlivé výrobky mezi sebou. Nejdříve však bude potřeba vytvořit vhodný model, následně jej upravit na konečné rozměry a ten se stane základem k tomu, aby jej poté bylo možné vytisknout a hodnotit.

V další části se bude model tisknout na 3D tiskárně. Doba trvání tisku velice závisí na rozměrech modelu, protože čím větší model bude, tím delší bude doba jeho tisku. Samozřejmě v rámci určité důvěryhodnosti experimentu je třeba vytisknout alespoň tři kusy pro porovnání se stejnými tiskovými parametry. Po vytištění bude následovat měření a vizuální kontrola každého vzorku, jejich porovnání mezi sebou, případně různé grafické znázornění toho, jakých přesností se s daným materiálem trysky dosáhlo.

Nakonec, po vyhodnocení všech naměřených hodnot a porovnání jednotlivých vzorků s ostatními, bude následovat závěrečné zhodnocení. Cílem je zjistit, zda má nějaký vliv změna materiálu extruderu 3D tiskárny na výslednou kvalitu tisku, jak po stránce vizuální, tak i rozměrové a tvarové přesnosti a tato otázka by měla být na konci této práce zodpovězena.

## 1 Teoretický rozbor problematiky 3D tisku

První kapitola této práce bude zaměřena na teoretický rozbor problematiky 3D tisku. Budou nastíněny počátky a vývoj tohoto průmyslového odvětví až do současné doby. Následující části budou koncentrovány k jednotlivým technologiím aditivní výroby a jejich srovnáním (výhody a nevýhody). Součástí kapitoly budou i používané tiskové materiály, jejich vlastnosti a vhodné aplikace v praxi.

### 1.1 Princip a použití aditivní technologie

Na začátek je třeba říct, že jakmile mluvíme o aditivní technologii (výrobě), jedná se o postupné vrstvení přídavného materiálu za účelem zhotovení výrobku požadovaných tvarů a rozměrů. Tímto způsobem je možno vrstvit např. plast, beton a nově také kov (často titan). Tato technologie nachází využití u tvorby prototypů, výrobků specifických tvarů, kde by nebylo možné použít jiný způsob výroby. Aditivní výroba se rovněž používá při restaurování nebo opravě dílů, které se již neprodávají, nebo při kusové výrobě <sup>15</sup>.

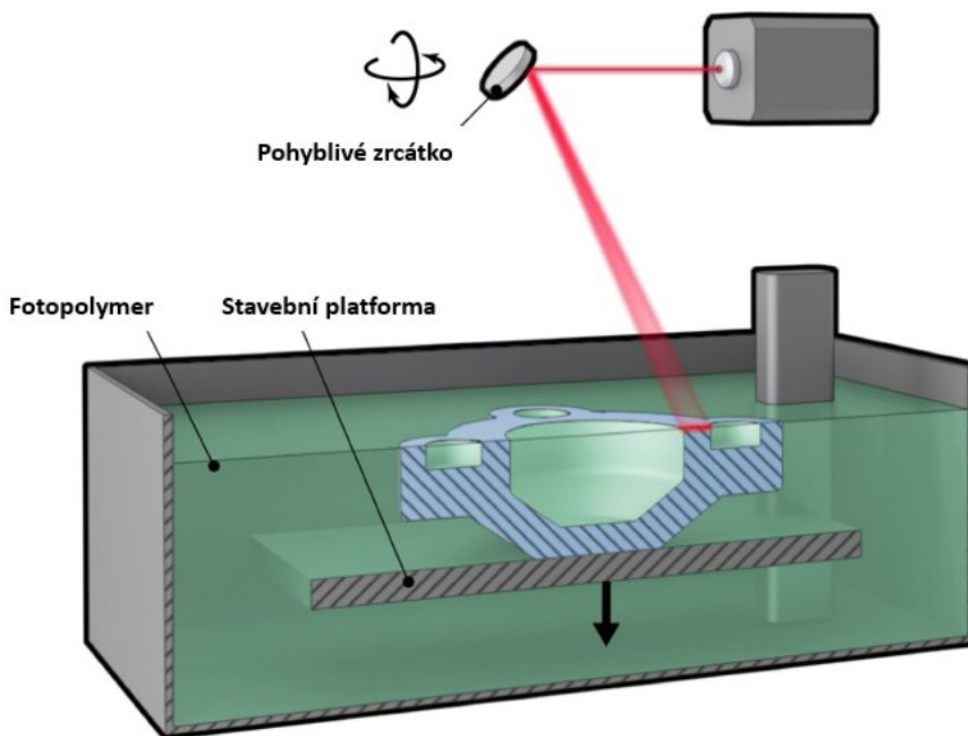
Z hlediska základních principů tvorby modelu lze aditivní technologii rozdělit do čtyř skupin:

- tiskový materiál je vytlačován přes tiskovou hlavu (extruder),
- tiskový materiál je v tekuté formě a je vytvrzován v určité tloušťce,
- tiskový materiál je spojen za pomoci lepidla, laseru atd. na tiskové podložce,
- tiskový materiál je oddělován v každé vrstvě <sup>24</sup>.

### 1.2 Historie a začátky technologií 3D tisku

Zakladatelem novodobého 3D tisku byl v roce 1984 Charles W. Hull, který si nechal patentovat technologii stereolitografie (SLA) a také jako první vytisknul 3D data. Založil společnost 3D Systems, která byla průkopníkem v tomto průmyslovém odvětví. 3D tisk byl v začátcích svého vývoje nazýván jako tzv. Rapid Prototyping. Jednalo se tedy o rychlé vytvoření zkušebního modelu, který měl ty výhody, že byl velice levný a mohl být hotový do druhého dne. I když se jednalo o začátky 3D tisku, touto metodou bylo možno vytisknout model s velkou přesností a dobrou kvalitou povrchu. Tímto způsobem bylo možné ušetřit poměrně značné finanční náklady na vývoj nových produktů. Princip metody spočívá v tom, že se výrobek vytváří v nádobě naplněné fotopolymérem, což je plast, který se vytvrzuje pomocí UV záření. Na začátku tisku, při tvorbě první vrstvy modelu, je stavební platforma v nejvyšší poloze a fotopolymery nad ní tvoří tenkou vrstvu.

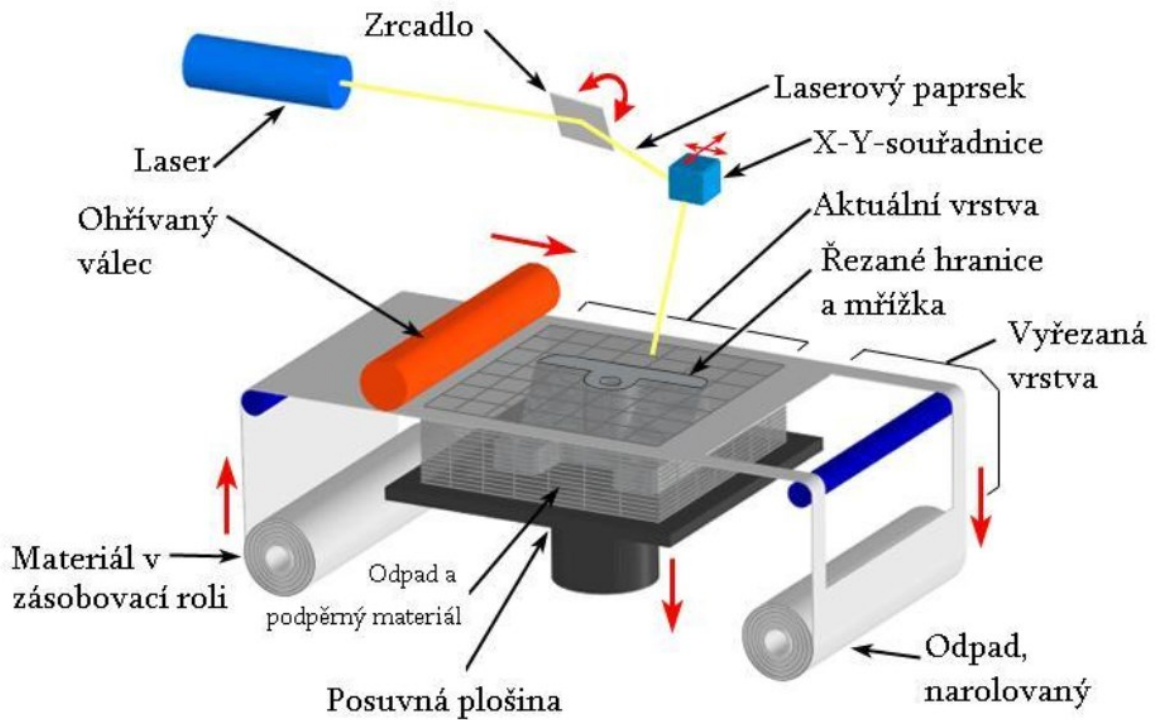
Pomocí UV záření a pohyblivého zrcátka je vytvořena první vrstva. Následně se stavební platforma pohybuje v určených intervalech dolů, až do úplného vytvoření výrobku. Princip metody lze vidět na Obr. 1<sup>16, 17, 22</sup>.



Obr. 1 – Princip tisku metodou SLA<sup>22</sup>

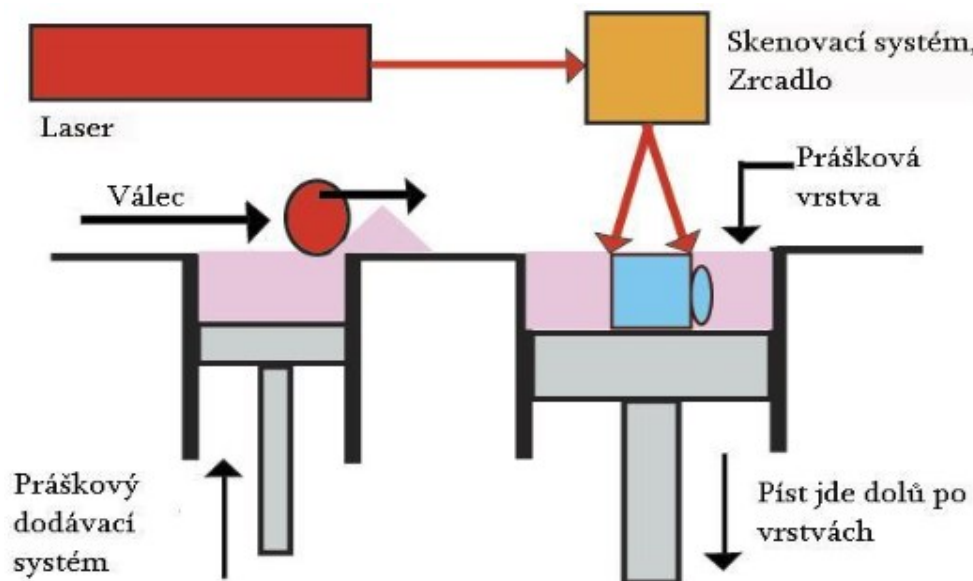
V průběhu následujících let se začaly vyvíjet další 3D technologie jakou je např. BPM (*Ballistic Particle Manufacturing*), kterou vynalezl v roce 1987 Bill Masters. Princip této metody tkví v tom, že je přídavný materiál (termoplast) ve formě malých kapek tlakově nanášen na pracovní desku, na které se po dopadu vytvoří pevná vrstva. Pro vytvoření 3D objektu se tento proces opakuje. Výhodou je možnost tvorby 3D objektu bez podpůrné konstrukce<sup>20</sup>.

Další technologií je tzv. LOM (*Laminated Object Manufacturing*), patentoval si ji Michael Feygin. Jedná se o postupné vrstvení materiálu, který je lepidlo, a tedy dobře přilne k předchozí vrstvě. Přídavným materiálem je plastová fólie navinutá na roli. Pro vytvoření vrstvy modelu se z role odvine požadovaná délka tiskového materiálu a přítlačný válec ji spojí s předchozí vrstvou, poté laser odstraní přebytečný materiál a ten se hromadí na druhé roli. Nevýhodou této metody je velké množství odpadního materiálu. Naopak lze dosáhnout vysoké přesnosti a vodorovné plochy mají kvalitní povrch, kdežto svislé plochy je třeba mechanicky opracovat. Za další výhodu lze označit cenu použitého tiskového materiálu, která je poměrně nízká. Tato metoda nachází využití během výroby větších modelů. Princip této metody je vidět na Obr. 2<sup>18, 19</sup>.



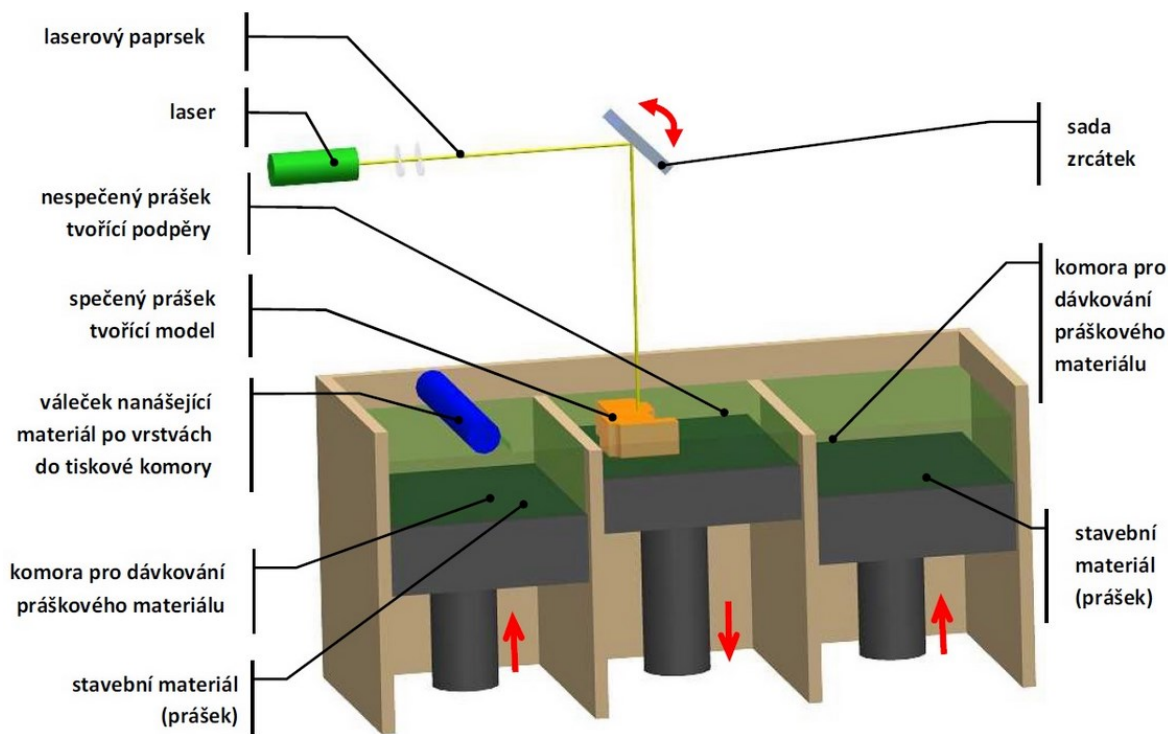
Obr. 2 – Princip tisku metodou LOM <sup>20</sup>

Následující technologií je metoda SLS (*Selective Laser Sintering*), která pracuje s přídavným materiálem ve formě prášku, jenž je spékán s předchozí vrstvou pomocí koncentrované tepelné energie, tedy laseru. Po nanesení tenké vrstvy práškového materiálu laser spéká tento materiál v daných místech s předchozí vrstvou a poté se celý cyklus opakuje. Nejvíce používanými materiály jsou keramika a různé druhy plastů (ABS, PET, Nylon atd.) Mezi výhody této metody patří nízké náklady na tiskový materiál, jehož přebytek lze použít i pro další modely, naopak nevýhodou je vysoká pořizovací cena samotné tiskárny, která se pohybuje v řádech milionů korun a také drsný povrch, který je po tisku třeba mechanicky opracovat. Princip metody je zobrazen na Obr. 3 <sup>21</sup>.



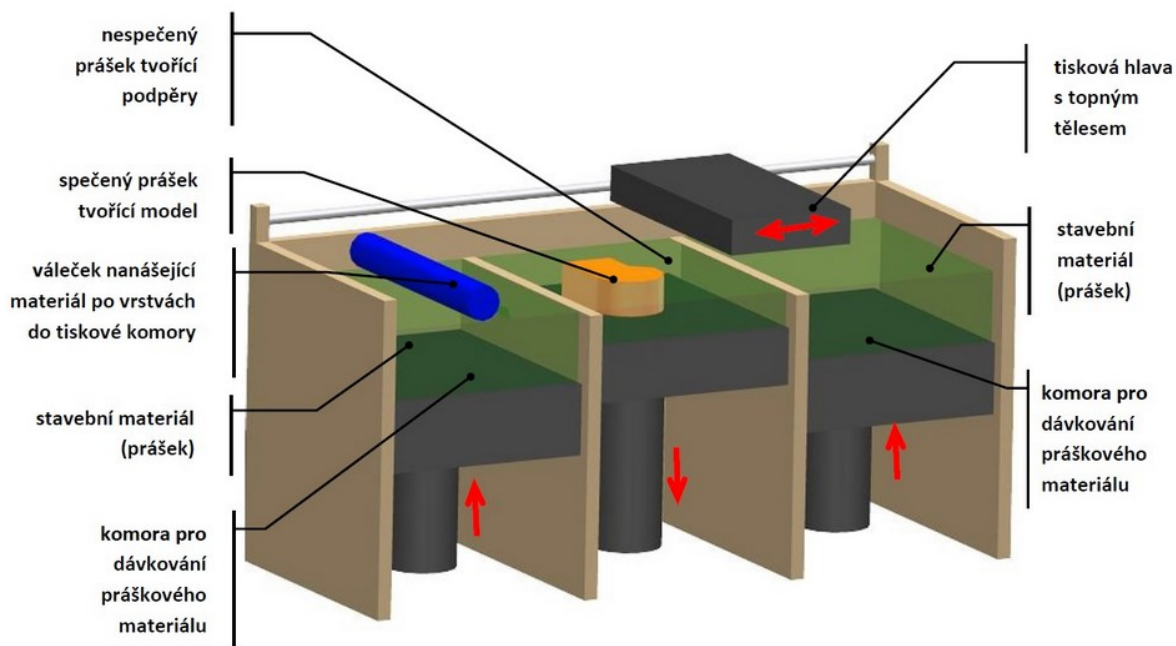
Obr. 3 – Princip tisku metodou SLS <sup>20</sup>

Další technologií 3D tisku je metoda DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*). Tento postup tisku je podobný metodě SLS, rozdíl je však v použitém tiskovém materiálu. Změna použitého tiskového materiálu vyžaduje větší výkon laseru, což má za následek vyšší teplotu při tisku. Při tisku se nejčastěji používá nerezová ocel, titan, inconel, bronz atd. Jako ochranný plyn je použit argon. Mezi hlavní výhody opět patří možnost tisku složitých tvarů s vysokou kvalitou povrchu, kterou lze dále vylepšit např. omíláním. Mezi nevýhody lze zařadit vysoké vstupní náklady na tiskárnu a také nutnost bezpečného skladování práškového materiálu (nebezpečí samovznícení a výbuchu). Princip metody DMLS lze vidět na Obr. 4<sup>21, 22</sup>.



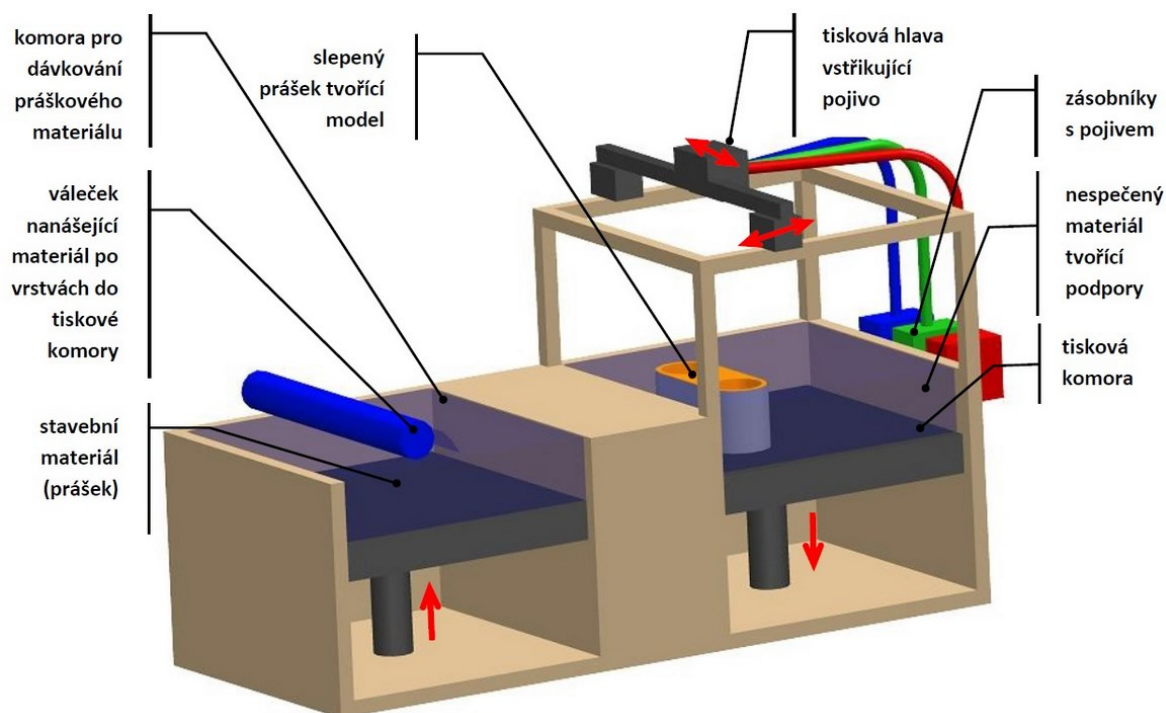
Obr. 4 – Princip tisku metodou DMLS<sup>21</sup>

Podobnou technologií DMLS je SHS (*Selective Heat Sintering*), která byla patentována firmou Blue Printer v roce 2002. Princip je stejný jako u již zmiňované metody DMLS, avšak místo laseru využívá metoda SHS topné těleso. Jakmile je nanesena vrstva prášku, tisková hlava vykoná těsně nad tímto povrchem přejezd, který jej vytvrdí. Jakmile je proces u konce, model se posune o definovanou výšku vrstvy dolů, znovu je nanesen prášek a postup se opakuje až do vytvoření požadovaného modelu. Nejčastěji používané materiály jsou PLA, ABS, Nylon, PET atd. Za hlavní výhody lze označit možnost tisku tvarově složitých a komplexních součástí, a to bez použití podpůrné konstrukce, kterou tato metoda nevyžaduje. Nepoužitý tiskový materiál (prášek) je rovněž ve 100 % recyklovatelný a lze jej použít pro tisk dalších výrobků. Mezi nevýhody této metody lze zařadit nutnost očištění hotového výrobku stlačeným vzduchem po vytisknutí. Pořizovací náklady těchto tiskáren se pohybují od několika set tisíc korun. Princip metody lze vidět na Obr. 5<sup>21</sup>.



Obr. 5 – Princip tisku metodou SHS <sup>21</sup>

Další technologií 3D tisku je BJ (*Binder Jetting*), která byla patentována společností 3D Systems v roce 1993 a k vytvrzování materiálu využívá chemickou cestu. Postup tvorby modelu je takový, že se do tiskové komory nanese vrstva prášku podávacím válečkem a poté je pomocí tiskové hlavy vstříknuto pojivo, které spojí jednotlivé mikročástice tiskového materiálu dohromady. Postup 3D tisku metodou BJ je vidět na Obr. 6 <sup>21</sup>.

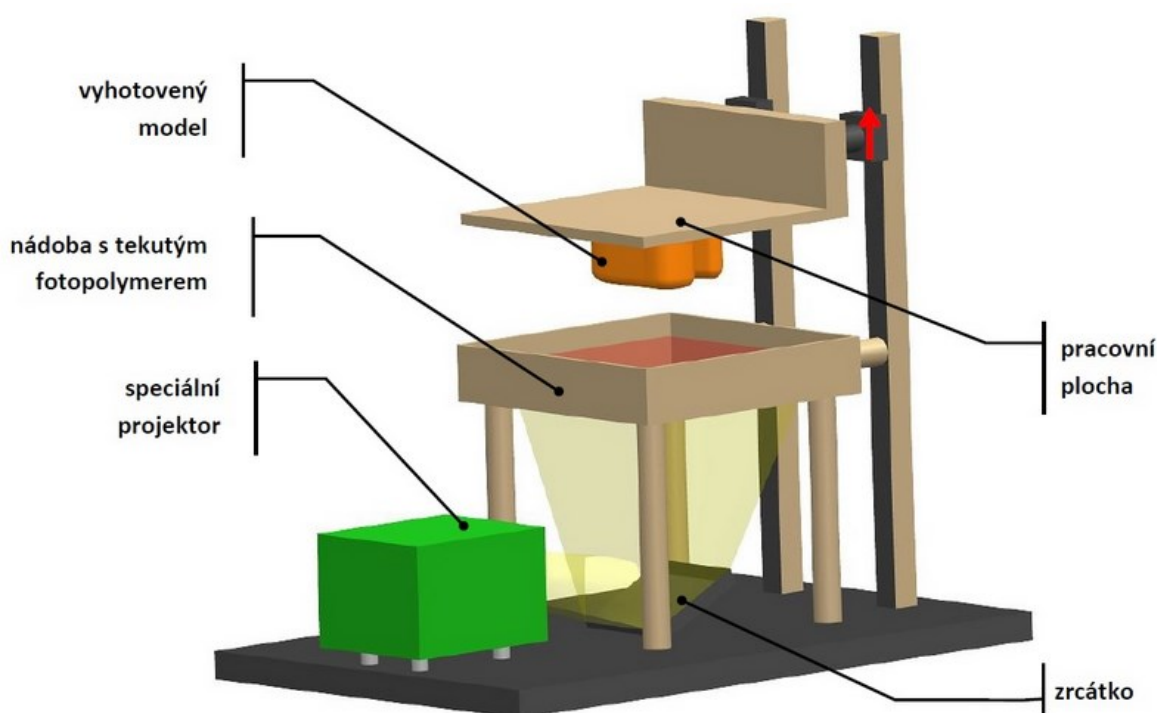


Obr. 6 – Princip tisku metodou BJ <sup>21</sup>



Mezi hlavní výhody metody BJ patří možnost použít mnoho druhů tiskových materiálů (hliník, nerezová ocel, keramika, kompozitní materiály). Lze rovněž tisknout barevné modely a samotný tisk je oproti jiným metodám rychlejší. Mezi nevýhody lze zařadit nutnost použít následné mechanické úpravy povrchu s cílem zlepšení mechanických vlastností výrobku a také vysoké vstupní náklady na tiskárnu v řádech milionů korun.

Následující technologií 3D tisku, která byla patentována až v roce 2012 a je tedy relativně nová, se nazývá DLP (*Digital Light Processing*). Princip tisku je obdobný jako u technologie SLA s tou výjimkou, že u DLP metody probíhá vytvrzování tekutého fotopolymeru najednou v celé vrstvě, což má samozřejmě dopad na rychlost tisku. K vytvrzení celé vrstvy modelu je používán speciální projektor a zrcátko. Princip této technologie je možno vidět na Obr. 7 <sup>21</sup>.

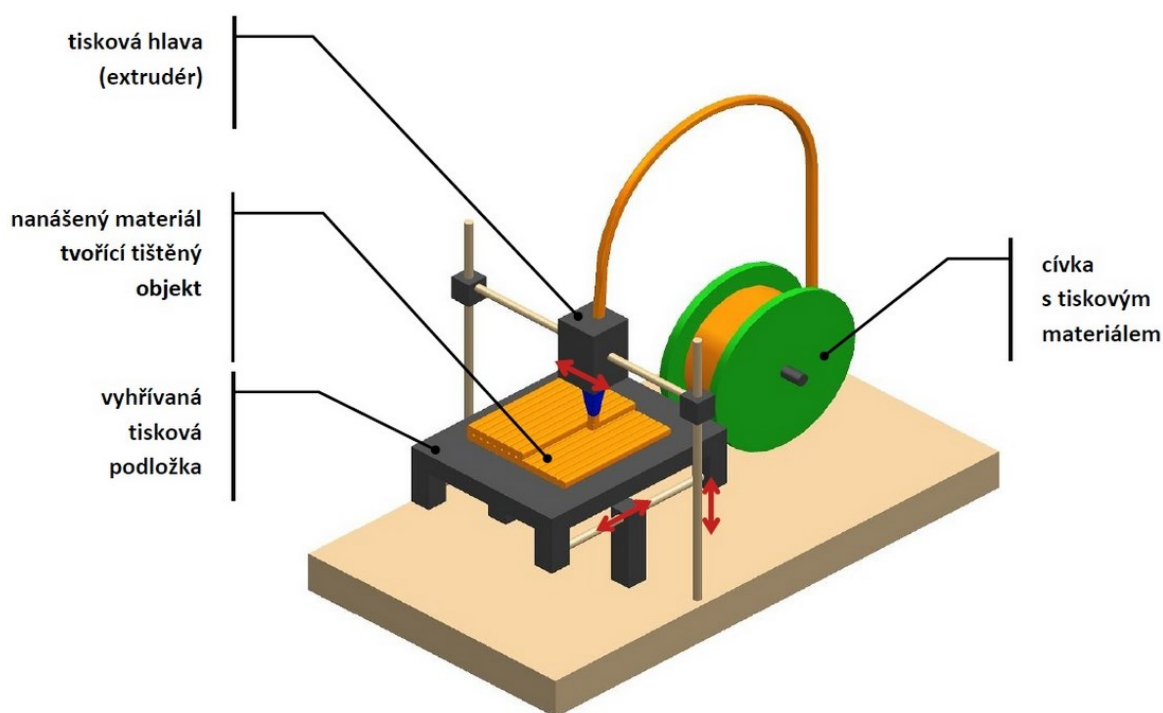


Obr. 7 – Princip tisku metodou DLP <sup>21</sup>

Mezi nevýhody metody DLP patří nutnost model po vytištění vytvrdit s cílem zlepšení jeho mechanických vlastností a rovněž je třeba mít na paměti výběr vhodného tiskového materiálu, protože touto metodou lze tisknout pouze z materiálů vytvrditelných UV zářením (fotopolymerů) <sup>21</sup>.

Poslední a pro tuto práci důležitou technologií 3D tisku je metoda FDM (*Fused Deposition Modeling*), která je zaregistrována firmou Stratasys. V některých literaturách se lze setkat s názvem FFF (*Fused Filament Fabrication*), kde se jedná o stejný princip tisku, avšak odlišné označení. Jedná se o nejrozšířenější technologii 3D tisku vůbec, která vznikla v roce 1989. Princip metody tkví v přidávném materiálu ve formě tenké struny (nejčastěji  $\varnothing 1,75$  mm), která je navinutá na cívce, prochází zahřátou tiskovou hlavou

(extruderem) a vytlačuje se přes trysku namontovanou na této tiskové hlavě. Otvor trysky je velký v řádech desetin milimetru. Nejpoužívanější je průměr trysky 0,4 mm, která vytváří rovnováhu mezi kvalitou a kvantitou. Jakmile je přídavný materiál protlačen podávacím mechanismem přes trysku, klade jej tiskárna na daná místa a vytváří 3D objekt. Po nanesení každé vrstvy se tisková hlava posune ve směru svislé osy nahoru a klade další vrstvu. Nedílnou součástí 3D tiskárny je také vyhřívaná tisková podložka, na které se model vytváří. Její teplota je určena druhem přídavného materiálu, ale nejčastěji se pohybuje od 50 °C do 90 °C. Jednotlivé materiály používané při 3D tisku metodou FMD jsou popsány v kapitole 1.4. Princip metody FMD je vidět na Obr. 8<sup>21, 23</sup>.



Obr. 8 – Princip tisku metodou FDM<sup>21</sup>

Nevýhodou tisku touto metodou je nutnost vytvářet tzv. podpůrné konstrukce, které slouží k bezpečnému vytištění částí modelu, které nemají ze spodní strany žádnou vzpěru. Podpůrná konstrukce je tvořena tenkými žebry, které se po vytisknutí modelu odstraňují mechanicky nebo odplavováním v kapalinách, pokud to provedení dovoluje. V případě složitější konstrukce tiskárny a vyšší ceně je možnost použít více tiskových hlav. Výhoda tohoto řešení spočívá v tom, že nosnou konstrukci lze tisknout z odlišného materiálu než požadovaný model. Po vytisknutí pak stačí model ponořit do lázně s kapalinou, která odstraní nosnou konstrukci, ale nijak nepoškodí a neznehodnotí model. Mezi další nevýhodu může patřit drsnost povrchu modelu po vytištění. Tento problém je třeba následně řešit mechanickou úpravou povrchu. Naopak výhodou tisku FDM metodou je možnost použití široké škály přídavných materiálů, a to s nízkými náklady, protože u této metody vzniká, až na podpůrnou konstrukci, minimální odpad. Další výhodou této



Marek Siwek: Vliv materiálu extruderu 3D tiskárny na kvalitu 3D tisku  
technologie jsou poměrně nízké vstupní náklady na pořízení tiskárny, jejíž cena se pohybuje od několika tisíc korun <sup>21</sup>.

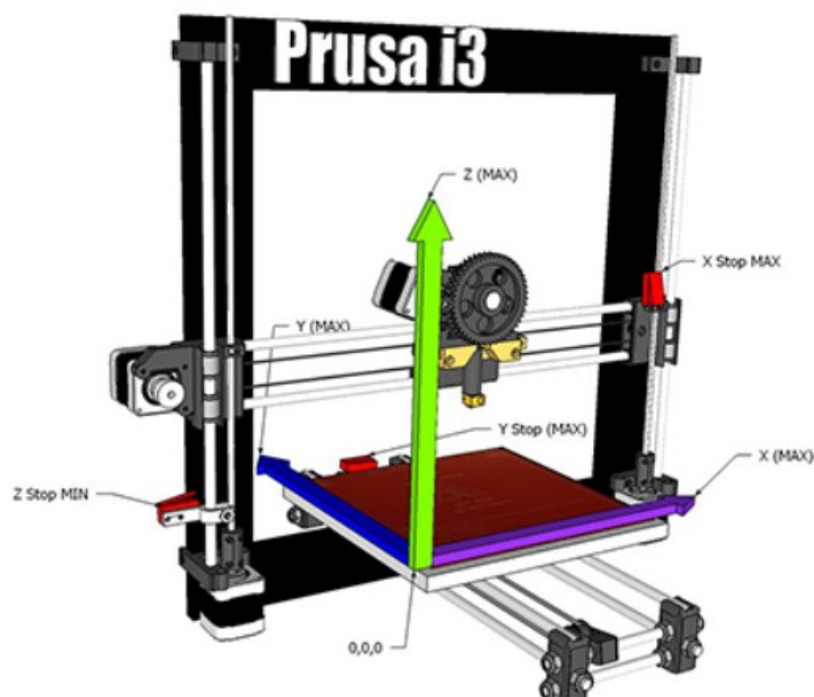
Na závěr této podkapitoly je třeba rovněž říct, že metod 3D tisku je více. V této práci však byly nastíněny pouze ty nejdůležitější a nejpoužívanější principy, se kterými se lze v praxi setkat.

### 1.3 Typy řízení FDM tiskáren

FDM tiskárny lze rozdělit z hlediska řízení nebo možnosti pohybů v jednotlivých osách na několik druhů, z nichž každá pracuje na jiném principu <sup>30</sup>.

#### 1.3.1 FDM tiskárna s kartézským systémem

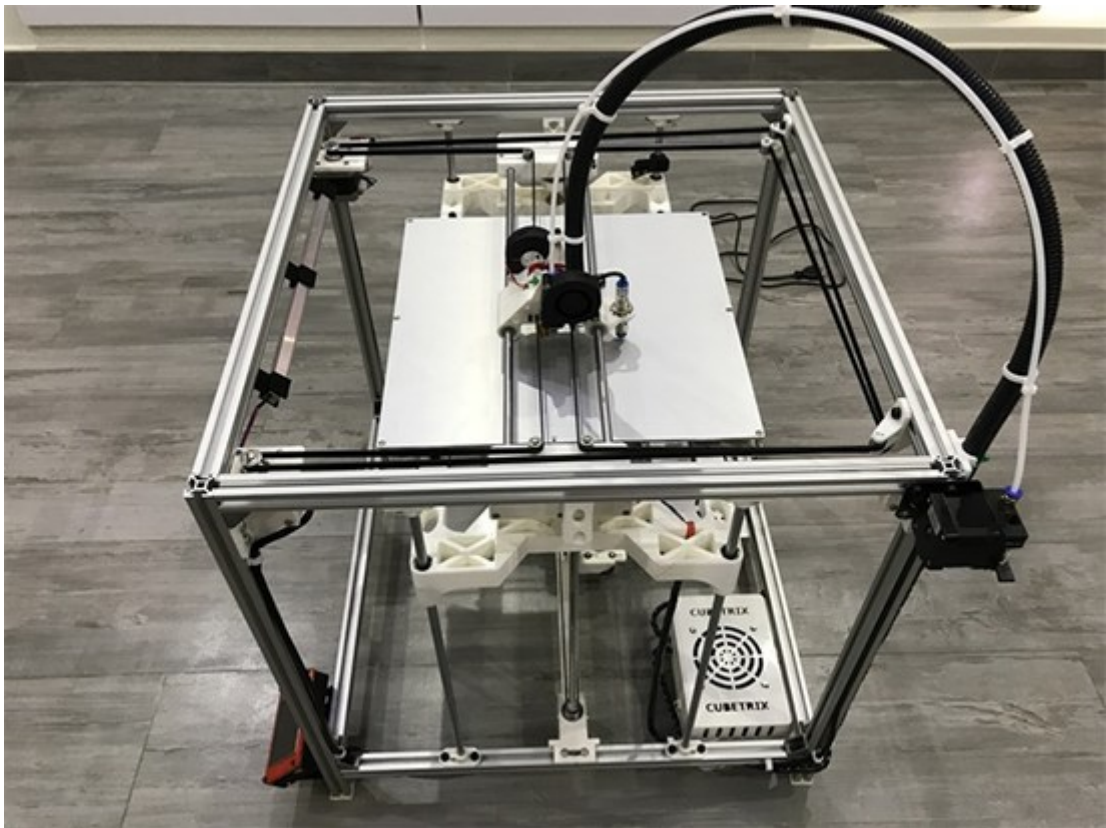
V dnešní době se jedná o nejrozšířenější ovládací systém. Pohyb tiskové hlavy je umožněn ve třech na sebe kolmých osách (X, Y a Z). Pohyby v jednotlivých osách jsou sprostředkovány pomocí vodících tyčí nebo řemenů. Pokud se jedná o tiskárnu vyšší cenové kategorie, může být použito lineární vedení. Pohyb v ose Y může být ještě rozdělen na pohyb tiskové hlavy nebo pohyb podložky. Stejně řešení lze realizovat i v ose Z, kdy výrobce zvolí rovněž z pohybu tiskové hlavy směrem nahoru nebo postupného snižování polohy vyhřívané podložky při tvorbě modelu. Z hlediska rozměru největšího výrobku, který se umístí na vyhřívanou podložku, se jedná přibližně o 200 až 300 mm v každé ose. V tomto případě se zde projevuje nevýhoda pohybu vyhřívané podložky v ose Y místo pohybu tiskové hlavy v ose Y. Jakmile je totiž tisknut vyšší výrobek, mohou vznikat rozměrové nepřenosti a vzhledové vady zapříčiněné rozkmitáním modelu vlivem velké rychlosti tisku. Tiskárnu s kartézským systémem lze vidět na Obr. 9 <sup>30</sup>.



Obr. 9 – Ukázka 3D tiskárny FDM s kartézským ovládacím systémem <sup>30</sup>

### 1.3.2 Core XY

Následujícím řídícím systémem těchto tiskáren je ovládání Core XY. Jedná se o systém, který je přizpůsoben pro tisk větších výrobků. Jeho výhodou je možnost použití vyšší rychlosti tisku, a tedy i úspory času společně s náklady na výrobu. Princip tkví v tom, že pohyb v osách X a Y vykonává tisková hlava a pohyb ve směru osy Z vyhrřívána podložka. Na model tedy nepůsobí velké síly ve vodorovné rovině a lze skrátit dobu tisku. Tiskárnu s pohybem Core XY lze vidět na Obr. 10 <sup>30</sup>.



**Obr. 10** - Ukázka 3D tiskárny FDM s ovládacím systémem Core XY <sup>30</sup>

Vzhledem ke tvaru a konstrukci takovýchto tiskáren je zaručena vyšší tuhost soustavy, ale z druhé strany jsou zde vysoké nároky na dodržení pravoúhlého provedení a problémem jsou i řemeny, které musí být správně napnuty, aby nedošlo k prokluzu a posunutí vrstev modelu. U takovýchto tiskáren se setkáváme nejčastěji s možností tisku modelu o velikosti strany až 400 mm <sup>30</sup>.

### 1.3.3 Delta

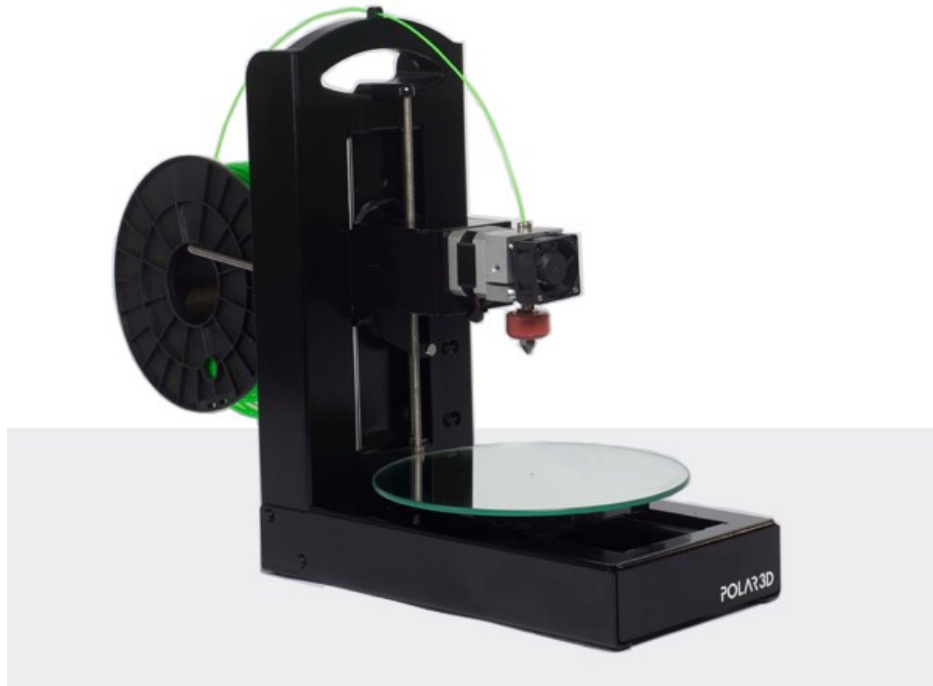
Další variantou FDM tiskárny je Delta. Jedná se o tiskárnu, která rovněž pracuje v kartézském systému s tím rozdílem, že tisková hlava je zavěšena na třech pohyblivých ramenech, která jsou upevněna na lineárním vedení konajícím pohyb nahoru a dolů. Jelikož je pohyb tiskové hlavy takto zprostředkováván, tiskárna pracuje na základě trigonometrických rovnic, kteréžto jsou složitější než u předchozích variant tiskáren. Výhodou těchto tiskáren je rychlý tisk za cenu horší kvality detailů. Schéma konstrukce tiskárny lze vidět na Obr. 11 <sup>30</sup>.



**Obr. 11** - Ukázka 3D tiskárny FDM s ovládacím systémem Delta <sup>31</sup>

#### **1.3.4 Polar**

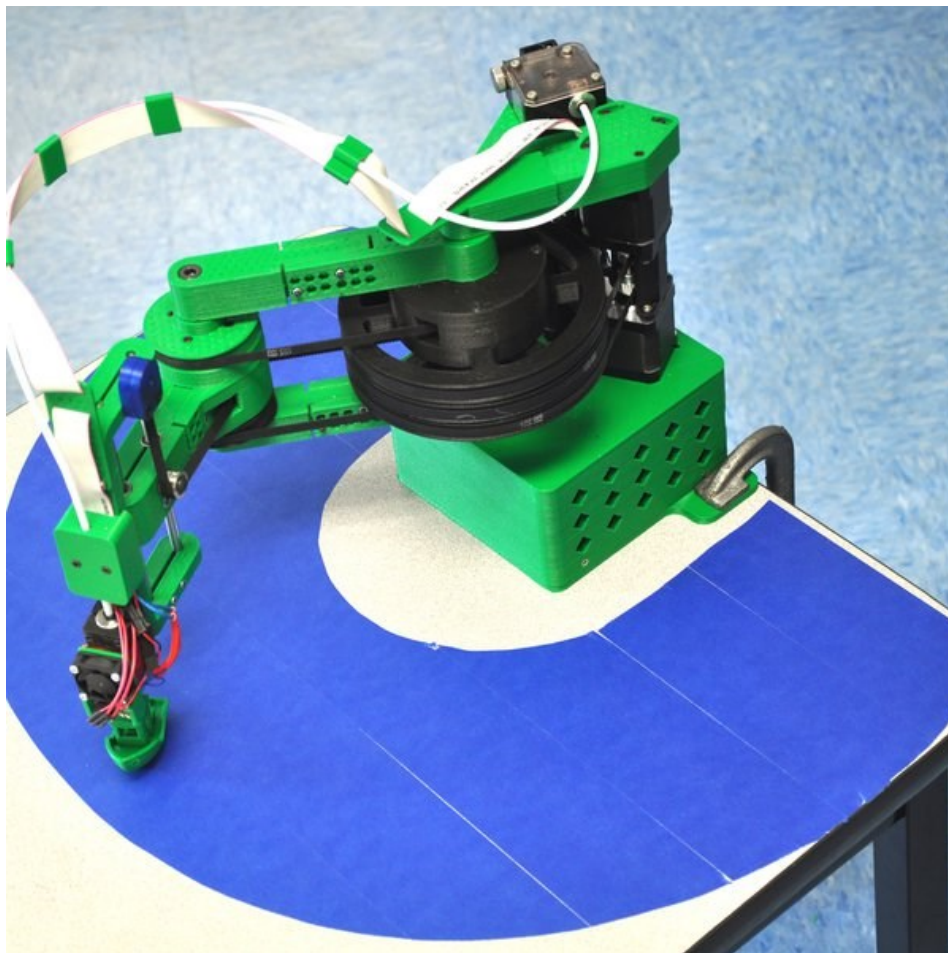
Další konstrukční možností, kterou metoda FDM nabízí je varianta Polar. Tato tiskárna pracuje s pevně umístěnou tiskovou hlavou, ale je zde tisková podložka, která se stále natáčí. Tisková hlava koná pouze pohyb v ose Z. Jelikož jsou u této varianty pohyblivé pouze dvě části, má jednodušší konstrukci a nachází se v ní pouze dva pohonné motory (u kartézské je zapotřebí alespoň čtyř). Z důvodů neustálého otáčení tiskové podložky ji nelze vyhřívat, protože by ji nebylo možné napájet. Tato nevýhoda samozřejmě navazuje na omezení z hlediska výběru tiskového materiálu. Na Obr. 12 je vidět vzhled tiskárny s řízením Polar <sup>30</sup>.



**Obr. 12** - Ukázka 3D tiskárny FDM s ovládáním Polar <sup>32</sup>

### 1.3.5 Scara

Poslední možností řízení 3D tiskárny je metoda Scara. Tato varianta se v praxi příliš nepoužívá. Jedná se o dvě mechanické paže (výjimečně jedno dvoukloubové rameno), na nichž je připevněna tisková hlava a koná pomocí těchto paží pohyb ve vodorovném směru. Jakmile je vrstva modelu vytištěna, celý mechanismus se posune o definovaný přírůstek směrem nahoru v ose Z. Tisková podložka je tedy stále na jednom místě a nepohybuje se, ba dokonce není nutností, aby byla spojena s tiskárnou. Tiskárnu typu Scara, která není pevně spojena s tiskovou podložkou lze vidět na Obr. 13 <sup>30</sup>.



Obr. 13 - Ukázka 3D tiskárny FDM s ovládáním Scara <sup>33</sup>

#### 1.4 Materiály používané při 3D tisku metodou FDM

V této podkapitole budou rozepsány různé druhy tiskových materiálů, které se v dnešní době používají při tisku metodou FDM, která je rovněž výchozí metodou při zpracování této práce. Materiálů používaných k 3D tisku je mnoho a každý z nich má určité výhody a nevýhody. Před volbou materiálu je třeba stanovit všechna rozhodovací kritéria např. kde bude výrobek používán, jaké by měly být jeho výsledné mechanické vlastnosti, zda-li je třeba, aby byl určitým způsobem odolný okolnímu prostředí atd. Pro metodu tisku FDM je charakteristických několik základních materiálů (ABS, PLA, WPC, PVA). Při tisku složitějších modelů na vyšší úrovni se také používají novější materiály, které mají lepší vlastnosti oproti základním tiskovým materiálům <sup>14</sup>.



### 1.4.1 ABS

Tiskový materiál ABS (*Akrylonitrilbutadienstyren*) je nejrozšířenějším východiskem pro tisk v domácích podmínkách. Jedná se o průmyslový termoplastický amorfni kopolymer, který má dobrou odolnost vůči mechanickému poškození. Teplota tisku by se měla pohybovat v rozmezí od 220 °C do 275 °C. Rozmezí teplot vyhřívání podložky je doporučeno od 100 °C do 130 °C. Teplotní odolnost tohoto materiálu je rovněž dobrá, jak při nízkých teplotách (méně než 0 °C), tak i za vysokých teplot (100 °C). Mezi další výhody patří malá nasákavost, zdravotní nezávadnost, odolnost vůči kyselinám, hydroxidům, uhlovodíkům, tukům nebo olejům. V případě nutnosti obrábění po vytisknutí lze ABS materiál zaručeně obrobit. Nevýhodou může být vysoká teplota tisku, která nemusí být na levnějších tiskárnách dosažitelná <sup>14, 25</sup>.

ABS materiál nachází využití u výroby nástrojů, které se používají v běžném provozu. Jsou z něj vyráběny různá ozubená kola, která nepřenáší velká zatížení, nosníky, šrouby, matice, čepy atd. ABS se běžně používá k výrobě stavebnice LEGO <sup>14, 25</sup>.

### 1.4.2 PLA

Dalším velice rozšířeným tiskovým materiálem, hlavně mezi začátečníky, je PLA (*Polylactic Acid*). Jedná se o kyselinu polymléčnou, která se vyrábí z bramborového či kukuřičného škrobu anebo z cukrové třtiny. Jak již bylo zmíněno, tento materiál je vhodný pro začátečníky v oblasti 3D tisku, jelikož se s ním dobře pracuje a nevyžaduje tak vysokou teplotu tavení jako předchodí ABS. Je to produkt z přírodního materiálu, a proto se dá dobře odplavit pomocí hydroxidu sodného. V návaznosti na to lze tento materiál úspěšně použít při tvorbě modelu, kde je zapotřebí přítomnosti podpůrné konstrukce a je možno použít alespoň dvě tiskové hlavy, kdy jedna tiskne výrobek (např. z ABS) a druhá tisková hlava tvoří podpůrnou konstrukci z PLA, která se poté odplaví v lázni s hydroxidem sodným. Teplota tisku se pohybuje od 185 °C do 235 °C, vyhřívání podložka se nahřívá do 70 °C <sup>14, 29</sup>.

PLA lze použít i pro tisk rozměrných předmětů, je to pružný, ale dostatečně odolný materiál, který je málo náchylný ke kroucení díky malému rozpínání za vyšších teplot. Jeho nevýhodou je sklon k pohlcování vzdušné vlhkosti a je tedy třeba zabezpečit vhodné podmínky k jeho skladování. V případě nedodržení pokynů ke skladování se mohou na povrchu předmětu objevit bubliny. Jestliže je nutno výrobek po vytištění mechanicky obrousit, je třeba brát ohled na nízký bod měknutí a použít během obrábění chlazení. Materiál PLA je rovněž vhodný pro povrchovou úpravu lakováním <sup>14, 29</sup>.

### 1.4.3 PA

Následujícím osvědčeným materiálem pro 3D tisk metodou FDM je PA (*Polyamid, Nylon*), který je velmi pevný, odolný a všestranný materiál. Jeho výhodou je velká flexibilita v tenkých vrstvách a také dobrá adhézní schopnost mezi jednotlivými vrstvami modelu, proto je často používán k tisku technických dílů (převodovky, čepy, ozubená kola, hřídele atd). V podstatě lze říct, že PA je lepší ABS, jelikož v porovnání dosahuje vyšší pevnosti, odolnosti vůči vysokým teplotám (až 150 °C) a jeho životnost je rovněž delší. Teplotu tisku je třeba volit od 235 °C do 260 °C. Vyhřívanou podložku se nahřívá mezi 100 °C a 130 °C. PA je také nákladnější materiál na tisk oproti jiným materiálům a jeho tisk trvá o něco déle<sup>14, 28</sup>.

Mezi jeho hlavní nevýhody patří náchylnost na vznik bublin na povrchu modelu, jelikož velice dobře absorbuje vzdušnou vlhkost (je hydrokopický) a tudíž musí být cívka s materiálem uchovávána v suchém prostředí (nádoba s odvlhčovačem), aby se tento jev co nejvíce eliminoval. Pokud je tento postup dodržen, výsledný povrch výrobku je lesklý a hladký<sup>14, 28</sup>.

### 1.4.4 PC

Následujícím tiskovým materiálem je PC (*Polycarbonates*). Jedná se o jeden z nejodolnějších filamentů, který se také často používá, pro jeho podobné vlastnosti, s materiálem ABS. Dobře odolává nárazům, a proto se často používá v automobilovém průmyslu a elektrotechnice. Má dobré elektroizolační vlastnosti, tudíž se také uplatňuje k tvorbě různých elektrických krabic, kde je zapotřebí dokonalé izolace od okolního prostředí. Jeho teplotní odolnost dosahuje až 150 °C a ohybovou pevnost si zachovává i za nízkých teplot. Další výhodou PC je UV stabilita, kterou lze i dále zvyšovat pomocí různých přísad (UV stabilizátorů). Jeho částečnou nevýhodou je vysoký bod tavení, a tudíž i zvyšující se teplota tisku, která se pohybuje od 250 °C do 290 °C, teplota vyhřívání podložky se optimálně pohybuje v rozmezí od 100 °C do 130 °C<sup>26, 27</sup>.

PC lze v praxi vidět jako kryt světlometů u aut a použití nachází i v elektroinstalaci (zásuvky, bezpečnostní prvky) nebo u domácích spotřebičů (mísy, formy)<sup>26, 27</sup>.

### 1.4.5 PVA

Dalším používaným tiskovým materiálem k tvorbě modelů při 3D tisku metodou FDM je PVA (*Polyvinyl Alcohol*). Jedná se o syntetický polymer, který se dá rozpustit ve vodě, tudíž jej lze použít podobně jako materiál PLA na podpůrnou konstrukci modelu. Pokud tomu tak je, je zapotřebí alespoň dvou tiskových hlav, z nichž jedna tiskne podpůrnou konstrukci z PVA a druhá tisková hlava tvoří model např. z PLA či ABS. Jakmile je model vytištěn, je ho zapotřebí ponořit do vody a odplavit PVA materiál. Jako u odplavování PLA, lze proces urychlit vyšší teplotou vodní lázně. Při tisku je třeba dbát na teplotu tisku, která nesmí přesáhnout 225 °C, jinak by mohl materiál PVA začít

krystalizovat. Doporučená teplota vyhřívání podložky je 60 °C až 70 °C. Na pohled je tento materiál průsvitný a má nažloutlou barvu. Vzhledem k dobré rozpustnosti ve vodě je rovněž zapotřebí zajistit suché prostředí pro skladování, jelikož PVA má snahu pohlcovat vzdušnou vlhkost a stačí nepatrné množství vody k tomu, aby byla narušena jeho struktura<sup>26</sup>.

#### 1.4.6 PEI

Následující používaný materiál je PEI (*Polyetherimid*). Jedná se o materiál, který má dobré teplotní vlastnosti, vysokou odolnost proti chemikáliím (alkoholy, automobilové kapaliny, vodné roztoky) a rozměrově je stabilní. Díky svým vlastnostem odolává hoření a zachovává si mechanické vlastnosti i za zvýšených teplot. Částečnou nevýhodou může být vysoká teplota tisku, která se pohybuje od 290 °C do 330 °C a tisk tedy musí probíhat pouze na tiskárnách s celokovovým extruderem<sup>26</sup>.

#### 1.4.7 PET-G

PET-G (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) je transparentní lesklý amorfni kopolyester, který je dobře odolný vůči mechanickému poškození. Je houževnatý a v závislosti na přísadách dobře odolný vůči působení nízkých nebo vysokých teplot. Jeho dobrou vlastností je zdravotní nezávadnost a malá nasákavost (do jisté míry odolný kyselinám, zásadám mýdlům a solím). Jeho rozpustnost může být sprostředkována pomocí ketonů, aromatických nebo halogenových uhlovodíků. Jeho výhodou je možnost tvarování za tepla nebo tzv. leštění ohněm. V praxi lze PET-G použít místo ABS, a tedy zmenšit tepelné smrštění modelu. Teplota tisku se pohybuje kolem 235 °C, vyhřívanou podložku se nahřívá na 60 °C až 80 °C v závislosti na doporučení výrobce<sup>26</sup>.

Rovněž jako nepřehledného množství metod tisku je i materiálů pro tisk metodou FDM mnoho. Existují samozřejmě i různé druhy jednotlivých materiálů, které mají příměsi a zlepšují mechanické vlastnosti, odolnost proti chemikáliím nebo s nimi lze docílit menšího teplotního smrštění modelu.



## 2 Návrh experimentu

Podstatou tohoto experimentu je navrhnout takový model, na kterém bude možno co nejlépe pozorovat kvalitu tisku při změně pouze jednoho parametru (materiálu trysky extruderu). Cílem je zjistit případné rozdíly, jak už po stránce vizuální kontroly, tak pomocí měření přesnosti tisku za stejných podmínek při tisku. Pro dosažení určité důvěryhodnosti výsledků budou zhotoveny tři modely vždy za stejných tiskových podmínek.

### 2.1 Vytvoření 3D modelu v modeláři

Tvorba předběžného návrhu 3D modelu je velice důležitá část experimentu, protože zásadně ovlivní časovou náročnost samotného tisku všech vzorků. Cílem je vytvořit takový model, na kterém se budou nacházet různé geometrické tvary, které se po vytištění vyhodnotí. Na základě konzultace s vedoucím bakalářské práce byl dohodnut přibližný tvar, jak by měl model vypadat, jaké by se na něm měly nacházet prvky a také, jak komplikovaný by měl být. Důležité je, aby bylo možné model vyrobit z hlediska toho, že na tiskárně nelze zhotovit některé tvary bez tzv. podpor, které mají tu funkci, že slouží pouze jako nosný materiál při tisku a po samotném vytištění je třeba je ulomit nebo mechanicky odstranit. Bylo rozhodnuto, že model nebude mít podpory a od tohoto rozhodnutí se také odvíjí jeho tvar.

Jedna z bočních stěn modelu je vytvořena pod různými úhly od vodorovné roviny. Jedná se o postupné zvyšování úhlu o  $10^\circ$  vůči předchozímu úhlu. Na doporučení vedoucího bakalářské práce byl zvolen počáteční úhel  $30^\circ$  a poté na něj plynule navazuje úhel  $40^\circ$  a nakonec  $50^\circ$  od roviny základny modelu. Úhel  $30^\circ$  je kritický a bude se na něm sledovat, jak si s ním tiskárna poradí s tryskama z odlišných materiálů (mosaz, titan, bronz).

Ostatní prvky na modelu se nachází na horní straně. Je zde vidět různé drážky, díry, zaoblení, zkosení nebo čtvercové útvary, které jsou vytvořeny jako dutiny nebo z modelu vyčnívají. Některé prvky jsou průchozí, jiné jsou neprůchozí (slepé). Z pohledu z horní strany na model je vidět čtyři průchozí drážky a čtyři průchozí díry skrze celý model. Tyto prvky budou sloužit k tomu, aby bylo možno zjistit, jak tiskárna zvládne vytisknout kruhy a půlkruhy, v závislosti na materiálu trysky. Je třeba ovšem také říct, že se jedná o velice levnou tiskárnu, jejíž cena se pohybuje kolem 5 000 Kč, a tudíž se může stát, že nebude schopna vytisknout požadovaný kruhový tvar. To je však pouze tvrzení, které je třeba potvrdit, či vyvrátit až po vytištění. Pro zjištění toho, jaký vliv bude mít velikost útvarů na výslednou přesnost, jsou čtvercové útvary postupně zmenšovány (zvětšovány). Minimální rozměr byl zvolen 1 mm (šířka drážky), a to z toho důvodu, že menší útvary by byly už obtížně měřitelné, dalším důvodem je také to, že u 3D tisku není hlavní prioritou přesnost, jako spíše vzhled.

## 2.2 Výběr vhodného softwaru pro přípravu před 3D tiskem

Po navržení modelu byl dokument převeden do formátu STL, který rozdělí model na mnoho menších trojúhelníků, které se nachází na jeho povrchu. Tento formát již lze dále zpracovávat v programech na přípravu před samotným tiskem, kde se nastavují parametry tisku. Pro nastavení režimu tisku bylo možné si vybrat mezi dvěma různými programy. Jednalo se o program Cura Ultimaker 14.07 nebo Repetier. Na základě malé zkušenosti z jednotlivými programy byly nainstalovány oba a porovnány mezi sebou. Každý software má určité klady a zápory. Po jejich porovnání bylo však nakonec rozhodnuto použít program Cura Ultimaker 14.07. Práce s tímto programem byla snazší a uživatelsky přívětivější. Za zmínku také stojí to, že pro tento krátkodobý účel by zcela jistě vystačil i program Repetier <sup>1</sup>.

## 2.3 Instalace programu na přípravu před 3D tiskem

Program na přípravu před 3D tiskem Cura Ultimaker 14.07 byl dodán vedoucím bakalářské práce. Jeho instalace nebyla nijak složitá, protože součástí složky byl i podrobný návod k instalaci programu. Nastavení základních parametrů, jakými jsou velikost vyhřívané tiskové podložky (*Machine width*, *Machine depth*), maximální výška modelu ve směru osy Z (*Machine height*) nebo průměr použité trysky (*Nozzle size*) jsou vidět na Obr. 14.

Configuration Wizard

### Custom RepRap information

RepRap machines can be vastly different, so here you can set your own settings.  
Be sure to review the default profile before running it on your machine.  
If you like a default profile for your machine added,  
then make an issue on github.

You will have to manually install Marlin or Sprinter firmware.

Machine name	<input type="text" value="A2"/>
Machine width (mm)	<input type="text" value="220"/>
Machine depth (mm)	<input type="text" value="220"/>
Machine height (mm)	<input type="text" value="220"/>
Nozzle size (mm)	<input type="text" value="0.4"/>
Heated bed	<input checked="" type="checkbox"/>
Bed center is 0,0,0 (RoStock)	<input type="checkbox"/>

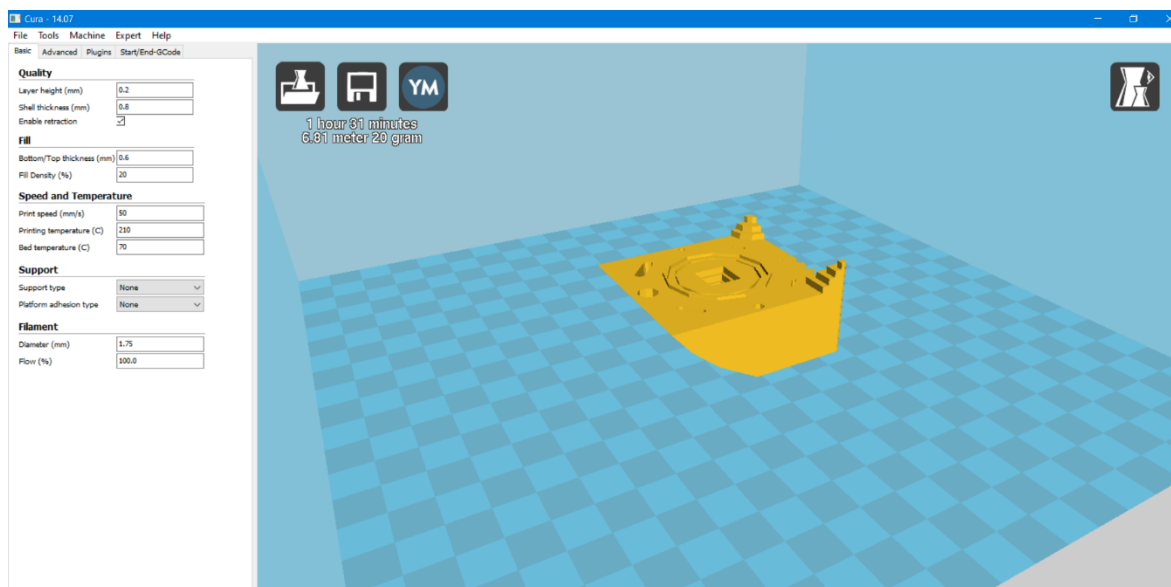
Obr. 14 – Nastavení základních parametrů tiskárny při instalaci programu na přípravu před 3D tiskem

## 2.4 Nastavení parametrů před 3D tiskem

V této fázi přípravy tisku jednotlivých modelů byly navrženy vhodné tiskové parametry, které budou následně použity při všech tištěných vzorcích. Na Obr. 15 je vidět uživatelské prostředí programu Cura Ultimaker 14.07, ve kterém byly upravovány parametry tisku.

### 2.4.1 Výška vrstvy

Prvním parametrem tisku, který je vidět na Obr. 15 je výška vrstvy (*Layer height*). Tento parametr tisku určuje posunutí tiskové hlavy (extruderu tiskárny) ve směru osy Z směrem nahoru od vyhřívané tiskové podložky. V mém případě se jedná o 0,2 mm. Tato hodnota výrazně ovlivňuje dobu tisku, a proto je třeba volit určitý kompromis mezi kvalitou a kvantitou. Tryska s větším průměrem je vhodná na tvarově jednodušší modely, na nichž se nevyskytuje mnoho malých detailů a lze tedy podstatně urychlit tisk, bez toho aniž by se nějak razantně snížila jeho kvalita. Naopak pokud se jedná o model, který je tvarově komplikovaný, nachází se na něm mnoho malých detailů, různé nápisy nebo malé geometrické útvary, které by měly být dobře viditelné, je třeba použít menší průměr trysky. Obecně platí, že výška vrstvy by neměla přesáhnout  $4/5$  průměru trysky. Při použití trysky extruderu o průměru 0,4 mm je tedy maximální doporučená hodnota posunutí ve směru osy Z  $0,32 \text{ mm}^2$ .

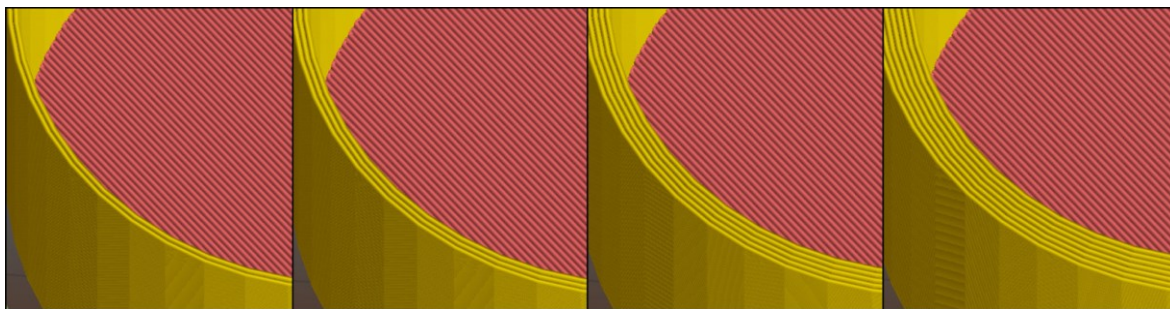


Obr. 15 – Uživatelské prostředí programu Cura Ultimaker 14.07 a ukázka základního nastavení při tisku

### 2.4.2 Tloušťka skořepiny

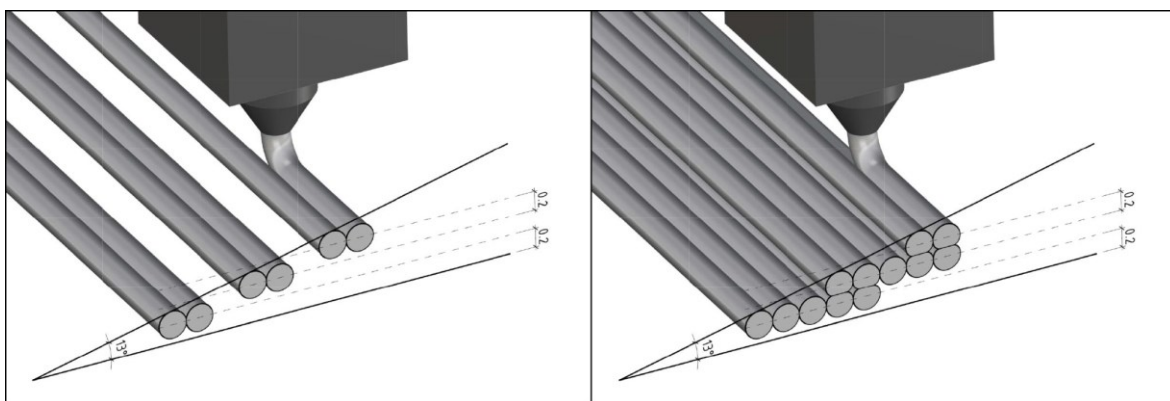
Dalším nastaveným parametrem je tloušťka skořepiny (*Shell thickness*), která udává sílu stěny skořepiny modelu. Jinak řečeno, je to tloušťka vnějšího obalu modelu a také i geometrických útvarů, které se na něm nachází. To znamená, že pokud je použita tryska o průměru 0,4 mm, tak bude výsledná tloušťka stěn násobkem tohoto čísla. Větší tloušťka skořepiny zvyšuje pevnost konstrukce, prodlužuje dobu tisku a dochází

k větší spotřebě materiálu. Na Obr. 16 lze vidět, jak vypadá okraj modelu tvořený dvěma stěnami (vlevo) anebo sedmi stěnami (vpravo) <sup>3</sup>.



Obr. 16 – Odlišné tloušťky skořepiny modelu <sup>3</sup>

V mém případě bylo zvoleno obvyklé nastavení, u kterého tryska zhotoví stěny na dva úkony, tedy síla stěny je 0,8 mm (dvojnásobek průměru trysky), jak je vidět na Obr. 15. V závislosti na hodnotě tohoto parametru bude možno pozorovat, jak si tiskárna poradí se šikmými plochami, hlavně tedy s kritickým úhlem 30° od vyhřívané tiskové podložky. V případě toho, že by byl model nevyhovující až do té míry, že by jej nešlo vytisknout, může být příčinou to, že je tloušťka skořepiny příliš malá a tištěný materiál nemá dostatečnou oporu, na kterou by se mohl přichytit. Tento problém během tisku by se musel vyřešit tím způsobem, že by bylo potřeba nastavit větší tloušťku skořepiny v závislosti na rozsahu poškození. Rozdíl mezi použitím dvou nebo pěti krajních vrstev na modelu lze vidět na Obr. 17. Při kladení dvou vrstev je větší riziko toho, že kladená vrstva nepřilne k předchozí. Naopak při stejných podmínkách (úhel sklonu boční stěny vůči vyhřívané podložce a průměr trysky), ale s použitím pěti krajních vrstev lze dosáhnout dostatečného překrytí a zmenšit tak riziko toho, že vrstva nebude mít dostatečnou oporu <sup>3</sup>.



Obr. 17 – Vliv počtu krajních vrstev na jejich tvorbu a návaznost <sup>3</sup>

### 2.4.3 Retrakce struny

Výhodou tisku je možnost použití tzv. retraktu struny (*Enable retraction*). Je to posunutí struny pomocí podávací kladky v opačném směru, než je směr, během kterého se filament pohybuje v průběhu tisku a klade další vrstvu na předchozí. Výhoda tkví v tom, že se zmenšuje riziko odkápnutí přídavného materiálu z trysky během přesunu tiskové hlavy z jednoho objektu nad druhý, mezi kterými není nosný materiál.

Rozsah této vady bude možno sledovat v závěru tisku, jakmile bude probíhat tištění dvou objektů na pravé straně modelu <sup>4</sup>.

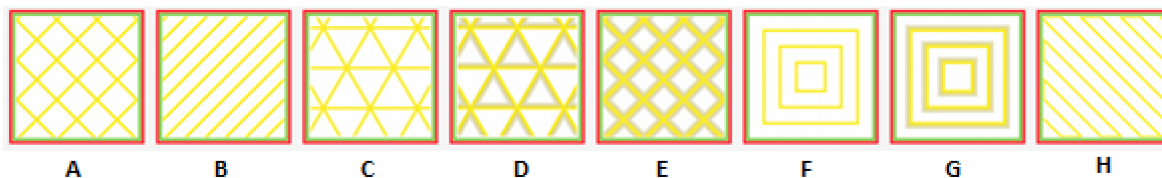
#### 2.4.4 Výška spodní a horní vrstvy modelu

Následujícím parametrem ovlivňujícím kvalitu tisku je výška spodní a horní vrstvy modelu (*Bottom/Top thickness*). Jedná se o tloušťku horní a spodní vrstvy, která je vyplněna ve 100 % přídavným materiálem (filamentem). Výška těchto vrstev ovlivňuje výsledný vzhled povrchu modelu a také snižuje pravděpodobnost výskytu vad. Výška horní a spodní vrstvy byla nastavena jako trojnásobek výšky jedné vrstvy (vzdálenost, o kterou se posune tisková hlava ve směru osy Z směrem nahoru). To tedy znamená, že spodní a horní vrstva modelu budou tvořeny třemi vrstvami, z nichž každá má tloušťku 0,2 mm. Nicméně s rostoucí tloušťkou spodní a horní vrstvy se podstatně zvýší čas tisku a vzroste také spotřeba přídavného materiálu <sup>5</sup>.

#### 2.4.5 Výplň modelu

Dalším důležitým parametrem tisku je výplň modelu (*Fill density*). Jedná se o vnitřní (neviditelnou) část modelu, která nemusí být vyplněna ve 100 % materiálem, protože je to zbytečné a nemá to téměř žádný vliv na kvalitu vytištěného modelu. Dalším důvodem nevyplnění vnitřního prostoru je podstatně menší časová náročnost tisku, menší hmotnost modelu (méně použitého přídavného materiálu), při zachování dostatečných pevnostních podmínek. Tato hodnota je určena procentuálně v poměru k objemu modelu. V praxi se používá relativně malá hustota výplně. Pro duté modely se používá 0 % výplně, modely sloužící převážně k vizuálnímu účelu obsahují 10 % až 20 % výplně. Podle potřeby lze zvyšovat množství výplně až na 100 %, má to však za následek razantní zvýšení doby tisku <sup>6</sup>.

Tiskárna také nabízí širokou škálu druhů výplní, které lze použít. Vzory jednotlivých tvarů výplní je vidět na Obr. 18.



Obr. 18 – Vzory výplně modelu podle použité hustoty <sup>6</sup>

Použití jednotlivého vzoru výplně (*Structure type*) se odvíjí od tvaru a povahy modelu, jeho členitosti a nabízeným možnostem tiskárny. Každá tiskárna má tedy své předem dané možnosti výplně. V mém případě byla zvolena výplň typu mřížka (viz Obr. 19), jejíž grafické znázornění je zobrazeno na levé straně Obr. 18 nad označením A. Jedná se o diagonální pohyby tryskové hlavy v obou směrech na každé vrstvě modelu.



Hustotu výplně modelu jsem zvolil 20 % a to z důvodu větší jistoty a celkové zvýšení pevnosti modelu <sup>6</sup>.

Expert config ×

<b>Retraction</b>		<b>Support</b>	
Minimum travel (mm)	1.5	Structure type	Grid
Enable combing	<input checked="" type="checkbox"/>	Overhang angle for support (deg)	60
Minimal extrusion before retracting (mm)	0.02	Fill amount (%)	15
Z hop when retracting (mm)	0.0	Distance X/Y (mm)	0.7
<b>Skirt</b>		Distance Z (mm)	0.15
Line count	1	<b>Black Magic</b>	
Start distance (mm)	3.0	Spiralize the outer contour	<input type="checkbox"/>
Minimal length (mm)	150.0	Only follow mesh surface	<input type="checkbox"/>
<b>Cool</b>		<b>Brim</b>	
Fan full on at height (mm)	0.5	Brim line amount	20
Fan speed min (%)	100	<b>Raft</b>	
Fan speed max (%)	100	Extra margin (mm)	5.0
Minimum speed (mm/s)	10	Line spacing (mm)	3.0
Cool head lift	<input type="checkbox"/>	Base thickness (mm)	0.3
<b>Infill</b>		Base line width (mm)	1.0
Solid infill top	<input checked="" type="checkbox"/>	Interface thickness (mm)	0.27
Solid infill bottom	<input checked="" type="checkbox"/>	Interface line width (mm)	0.4
Infill overlap (%)	15	Airgap	0.22
		Surface layers	2
		<b>Fix horrible</b>	
		Combine everything (Type-A)	<input checked="" type="checkbox"/>
		Combine everything (Type-B)	<input type="checkbox"/>
		Keep open faces	<input type="checkbox"/>
		Extensive stitching	<input type="checkbox"/>
		Ok	

Obr. 19 – Ukázka odborného nastavení při tisku v programu Cura Ultimaker 14.07

#### 2.4.6 Použité rychlosti při tisku

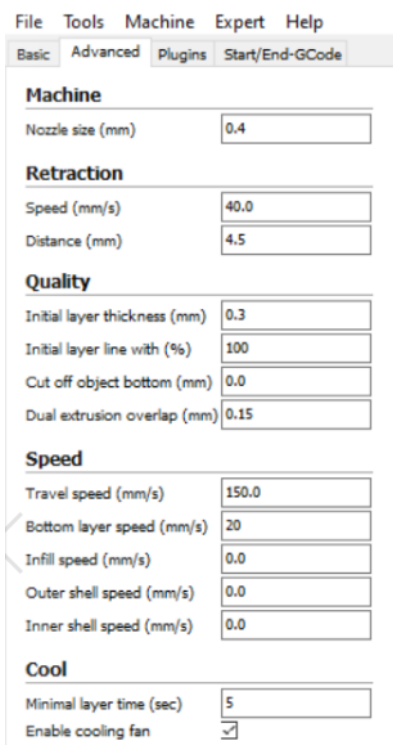
Následující možnosti při tisku se zaměřují na rychlost tisku první vrstvy modelu (*Bottom layer speed*), rychlost samotného tisku (*Print speed*), přejezdovou rychlost (*Travel speed*) a rychlost retrakce (*Retraction speed*).

Největší význam na kvalitu a rychlost tisku má, z výše zmiňovaných rychlostí při tisku, rychlost samotného tisku. Tato hodnota byla v mém případě zvolena 50 mm/s. To znamená, že se tisková hlava posune během tisku o 50 mm za 1 sekundu. Na rychlosti tisku je závislá do jisté míry i teplota tisku (*Printing temperature*), protože pokud by byla zvolena vysoká rychlost tisku, zvýšila by se i spotřeba přídavného materiálu, tudíž i jeho rychlost přes extruder a musela by se i v závislosti na to zvýšit teplota tisku, aby došlo ke správnému natavení (roztavení) vlákna. V případě příliš malé teploty tisku by mohlo dojít k tomu, že by se materiál při průchodu tryskou dostatečně neohřál a nepřilnul by k předchozí vrstvě. Pokud je rychlost tisku zadaná, program

Cura Ultimaker 14.07 si již automaticky sám vypočítá správný tok vytlačování filamentu (*Filament flow*) <sup>7</sup>.

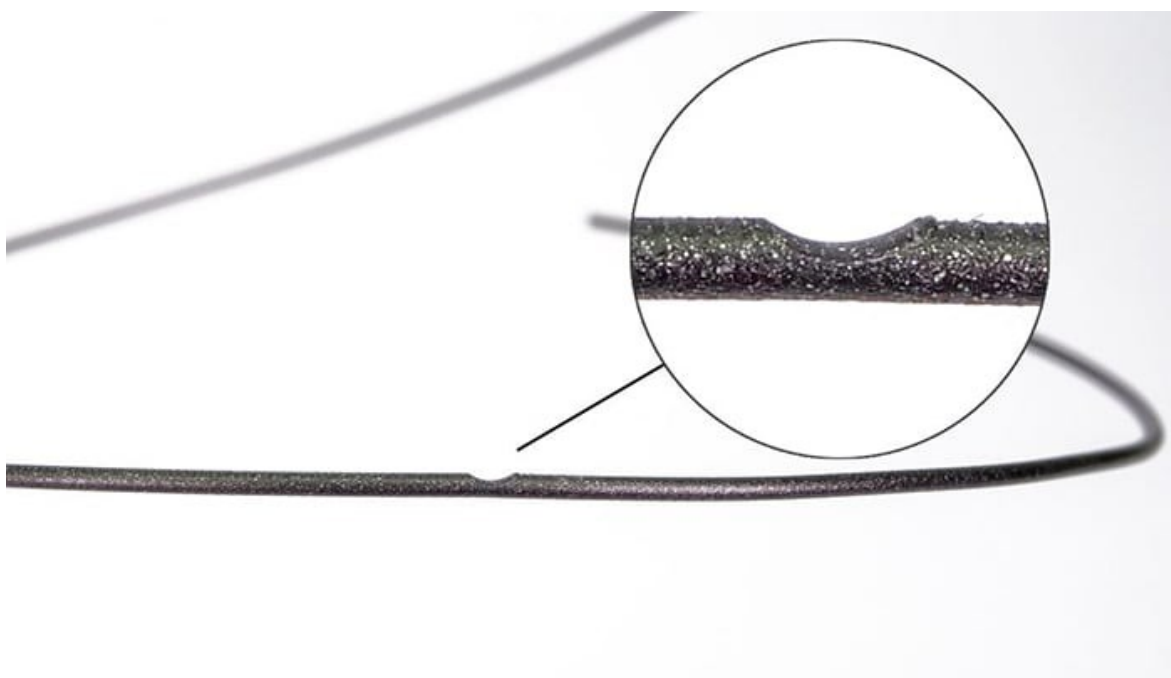
Následujícím neméně důležitým parametrem v průběhu tisku je rychlost tisku první vrstvy. Tato rychlost je nižší než rychlost samotného tisku, protože je třeba, aby materiál k vyhřívané tiskové podložce dobře přilnul a neměl snahu se na okrajích (rozích) zvedat. Z tohoto důvodu je rychlost tisku první vrstvy 20 mm za sekundu. Je třeba také říct to, že vlivem výměny trysky dochází k zavedení určité chyby ve směru osy Z (výrobní nepřesnosti, tuhost stroje). Tuto odchylku je třeba odstranit pomocí korekce výšky vyhřívané podložky, která se provádí utažením (snížením polohy podložky v ose Z) nebo povolením (posunutím směrem ke hlavě extruderu) jednoho ze čtyř šroubů, které jsou umístěné na každém rohu vyhřívané podložky <sup>7</sup>.

Dalším rychlostním parametrem ovlivňujícím tisk je rychlost přejezdu tiskové hlavy mezi jednotlivými útvary nebo při tisku více součástí najednou. Jedná se o rychlost, kterou se pohybuje tryska vůči vyhřívané podložce bez toho, aniž by probíhalo vytlačování přídatného materiálu z trysky. Cílem je zmenšit riziko odkapávání filamentu skrze trysku a znehodnocování tištěného modelu přebytečným materiálem, který bude třeba následně odstranit. V mém případě byla zvolena rychlost přejezdu 150 mm za sekundu, tedy trojnásobek rychlosti tisku viz Obr. 20. Nevýhodou rychlých přejezdů je ovšem možnost kolize extruderu s již vytištěným materiálem. Zabránit tomuto problému lze použitím funkce *Z hop when retracting*, která při každém přejezdu trysky způsobí to, že se tisková hlava oddálí o předem nastavenou hodnotu od tištěného modelu, poté se přesune na novou pozici a vrátí se do správné výškové hladiny <sup>7</sup>.



**Obr. 20** – Ukázka pokročilého nastavení při tisku v programu Cura Ultimaker 14.07

Posledním rychlostním parametrem tisku je rychlost retrakce. Jedná se o rychlost zpětného potažení filamentu za účelem toho, aby se mohla tisková hlava přemístit nad jiný objekt a aby nedošlo v průběhu přemísťování k ukápnutí přídavného materiálu z trysky. Potažením filamentu o předem danou hodnotu se sníží tlak v extruderu a materiál nemá takovou snahu vytékat z trysky. Rychlost retrakce u mého experimentu je 40 mm za sekundu. Jestliže by byla tato rychlost příliš malá, neměla by funkce zpětného potažení filamentu takovou účinnost a mohlo by docházet k ukapávání materiálu. Pokud by však rychlost retrakce přesáhla určitou kritickou mez, mohlo by dojít k degradaci filamentu v okolí podávacích kladek, jak je znázorněno na Obr. 21. Doporučená rychlost retrakce pro PLA materiál je 40 až 60 mm za sekundu <sup>8</sup>.



**Obr. 21** – Degradace filamentu způsobena vysokou rychlostí retrakce <sup>8</sup>

#### **2.4.7 Použitý tiskový materiál**

Jako materiál použitý pro všechny tištěné modely v této práci byl použit nejvíce populární PLA filament, respektive PLA-T, který má lepší mechanické vlastnosti (přibližně šestinásobně větší houževnatost, lepší odolnost vůči nárazům) oproti běžnému PLA materiálu. Pro tisk byl zvolen materiál PLA-T, jelikož je jeho použití snazší než u jiných materiálů jako např. ABS, které vyžadují vyšší teplotu vyhřívání podložky i extruderu tiskárny. Je třeba také zmínit to, že vytištěné modely nebudou mít žádné další využití kromě toho, že budou podrobeny měření, tudíž nemusí být kladeny žádné vysoké nároky na teplotní stabilitu nebo pevnost <sup>9</sup>.

#### **2.4.8 Teplota vyhřívání podložky**

Teplota vyhřívání podložky je jeden ze základních parametrů při tisku, který závisí na volbě přídavného materiálu, tvaru výrobku, jeho rozměrů a osobních zkušenostech. Pro materiál PLA (PLA-T) je obecně doporučeno soustředit se v rozmezí teplot



od 50 °C do 70 °C. Na základě konzultace s vedoucím bakalářské práce a již provedených výzkumů jsem zvolil větší teplotu vyhřívání podložky, tedy 70 °C <sup>10</sup>.

Pokud by při tisku nastal problém, který by naznačoval, že je teplota příliš vysoká (deformace na začátku tisku), musela by být uzpůsobena a provedl by se kontrolní tisk, zda se problém vyřešil. Nízká teplota podložky má tu nevýhodu, že se model rychle ochlazuje a nemusí dojít k dostatečnému přilnutí vrstev mezi sebou <sup>10</sup>.

#### **2.4.9 Teplota extruderu**

Teplota extruderu je neméně významná jako teplota vyhřívání podložky a její hodnota je opět závislá na použitém materiálu. Pro materiál PLA (PLA-T) je výrobcem doporučená teplota od 190 °C do 210 °C. Při návrhu experimentu byly zvoleny dvě teploty, při nichž se budou vzorky tisknout. Touto změnou se bude sledovat, zda změna teploty extruderu při každé trysce povede ke změně kvality, protože není řečeno, že např. titanová tryska bude tisknout stejně kvalitně při 190 °C extruderu, jak při 210 °C. Každá tryska může a nemusí mít své teplotní požadavky a na závěr této práce by měla být tato otázka zodpovězena <sup>11</sup>.

Pokud by byla teplota příliš malá, filament by se nemusel stačit dostatečně natavovat a vytlačování materiálu přes trysku by nebylo stejnoměrné. Další nevýhodou nízké teploty extruderu je vyšší namáhání podávacího zařízení, které by muselo překonávat větší odpor. Naopak při vyšší teplotě extruderu dochází k tomu, že má snahu vytlačovaný materiál ukapávat během přejezdu mezi jednotlivými útvary modelu nebo více objekty nacházejícími se na vyhřívání podložce. Při použití vyšší teploty trysky by také mohla nastat situace, že se přídatný materiál moc přehřívá a může se pálit, což by mohlo vést ke změně jeho barvy (horší vizuální vlastnosti) a nejspíš i k horším mechanickým vlastnostem <sup>11</sup>.

#### **2.4.10 Použité trysky**

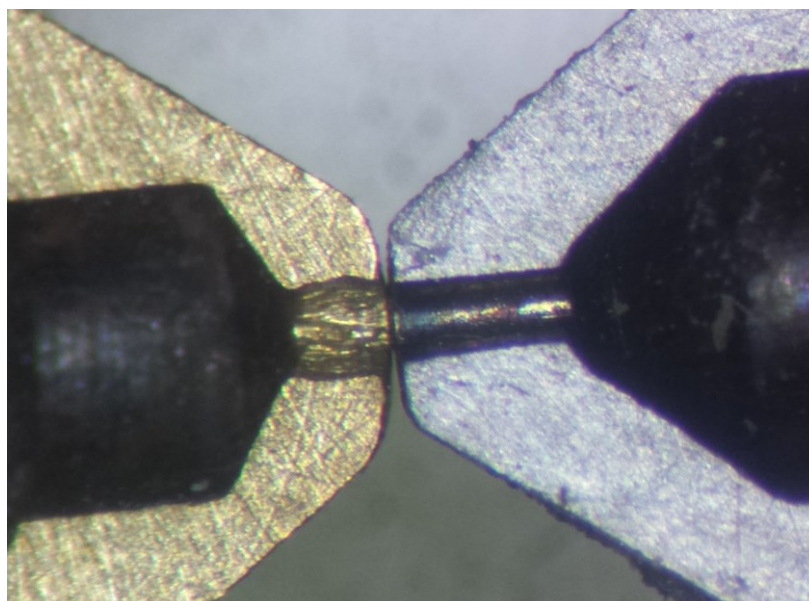
Výběr vhodných trysek probíhal na základě konzultace s vedoucím bakalářské práce. Jednalo se o využití trysek, které již byly připraveny předem a koupeny v Číně a bylo tím tedy ušetřeno spoustu času na přepravu.

Pro tento experiment byly použity tři stejné trysky, které se liší pouze použitým materiálem, ze kterého jsou vyrobeny. Všechny tři použité trysky je vidět na Obr. 22.



**Obr. 22** – Použité trysky při tisku a jejich rozměry

V praxi se nejčastěji používá mosazná tryska, kterou lze tisknout běžné materiály jako např. PLA, ABS nebo PET-G. Jejím nedostatkem však je, že se při tisku více abrazivního materiálu poměrně rychle opotřebovává. Tato nevýhoda se dá však částečně odstranit použitím trysky s lepší oteruvzdorností, tedy tisknout s ocelovou nebo titanovou tryskou, která vydrží déle, ale je dražší oproti mosazné. Pro porovnání je na Obr. 23 vidět opotřebení mosazné a ocelové trysky za použití stejného tiskového materiálu. Dalším rozdílem je kromě trysky z jiného materiálu i množství průchozího přídavného materiálu. Přes každou z trysek na Obr. 23 prošlo jiné množství tiskového materiálu. Konkrétně se jedná o 250 g u mosazné trysky a přes ocelovou trysku prošlo 2 500 g tiskového materiálu. Na základě pozorování na Obr. 23 lze vidět poměrně malé opotřebení u ocelové trysky ve srovnání s mosaznou tryskou.

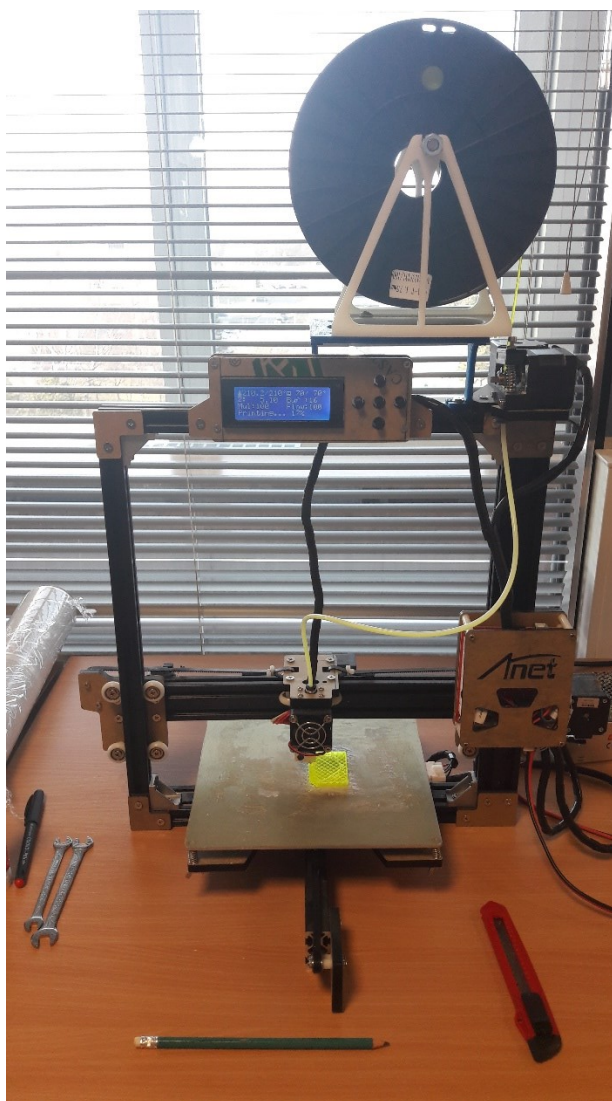


**Obr. 23** – Porovnání opotřebení mosazné (vlevo) a ocelové (vpravo) trysky <sup>12</sup>

## 2.5 Výběr vhodné tiskárny

Volba tiskárny samozřejmě probíhala na základě její dostupnosti, mobility a doporučení. Na základě konzultace s vedoucím bakalářské práce bylo možné vybrat jednu ze tří dostupných tiskáren, které byly vhodné na provedení tohoto experimentu. Jednalo se o tiskárnu EASY3DMAKER, Anet A2 a Felix.

Hlavním rozhodovacím kritériem byl požadavek snadné výměny trysky u 3D tiskárny, protože během tisku ji bude třeba několikrát měnit. Jako uživatelsky nejpřívětivější pro obsluhu byla výměna trysky na tiskárně Anet A2, proto byla také zvolena jako tiskárna, na které bude experiment probíhat (viz Obr. 24). Ostatní tiskárny by bylo možné využít také, ale např. na tiskárně EASY3DMAKER je z důvodů bezpečnosti extruder chráněn ocelovým krytem, který by bylo nutno při každé výměně trysky odmontovat a zpět nasadit.



Obr. 24 – Tiskárna Anet A2

### 3 Realizace experimentu

Tato kapitola již bude zaměřena na samotný tisk jednotlivých modelů na 3D tiskárně, na které se bude v průběhu tisku postupně měnit trysky a sledovat změny v kvalitě tisku v závislosti na jejich výměně. Jak již bylo zmíněno, pro účel této práce budou vytisknuty vždy tři modely za stejných tiskových parametrů s cílem možnosti porovnávání jednotlivých výsledků mezi sebou.

#### 3.1 Prostředí při 3D tisku

Experiment probíhal v prostorách VŠB-TUO v místnosti, kde se teplota vzduchu pohybovala přibližně kolem 25 °C. Z důvodu toho, aby nebyl experiment ovlivněn velkými teplotními výkyvy, při nichž by mohlo dojít k různému teplotnímu průběhu ve vzorcích, byly všechny modely vytištěny v krátkém časovém období.

#### 3.2 Pracovní pomůcky použité při tisku

Při tisku byly použity pracovní pomůcky, které lze vidět na Obr. 25.

Pro pevné přichycení první vrstvy modelu bylo použito lepidlo Kores. Při zakládání první vrstvy modelu je důležité vyrovnat podložku vůči extruderu 3D tiskárny, jak bylo popsáno v kapitole 2.4.6. Dalším neméně podstatným úkolem je zajistit dobré přilnutí základní vrstvy na vyhřívanou podložku 3D tiskárny. Pro materiál PLA (PLA-T), který je z hlediska náročnosti na tisk jednodušší, by nebylo třeba nanášet lepidlo, ale je to samozřejmě lepší, protože se snižuje pravděpodobnost vzniku vad (nepřilnutí první vrstvy modelu k vyhřívané podložce). Nevýhodou nanesení lepidla je horší oddělování hotového modelu po tisku. Naopak výhodou je lepší soudržnost modelu s vyhřívanou podložkou, a tedy i menší riziko odlepení nebo postupné zvedání (vlivem vneseného tepla) okraje modelu.



Obr. 25 – Pracovní pomůcky použité při 3D tisku na tiskárně Anet A2



Pro oddělení hotového modelu od vyhřívané podložky byl použit obyčejný odlamovací nůž. Na začátku tisku však ještě byla použita špachtle, ale její čelo nebylo dostatečně ostré, aby proniklo mezi vyhřívanou podložkou a modelem, a oddělilo model od podložky. Byl tedy použit odlamovací nůž, který si vedl mnohem lépe. Při oddělování modelu od podložky bylo třeba ale dbát na to, aby nedošlo k jejímu poškození ostrým nožem. Bylo také zjištěno, že model se mnohem lépe odděluje od podložky ihned po tisku. Je to nejspíš způsobeno tím, že je spodní vrstva naneseného lepidla ještě teplá a mnohem snáze se odlepí, než kdyby již model vychladnul. Na základě tohoto zjištění rozhodně doporučuji model oddělovat od podložky ihned po vytisknutí a nečekat až vychladne. Toto tvrzení ovšem platí u tiskového materiálu PLA-T a kancelářského lepidla Kores, tudíž mohou být dosaženy i jiné výsledky s použitím odlišných materiálů. Toto zjištění má i vliv na bezpečnost, protože jakmile se stalo, že model vychladnul, jeho oddělení od tiskové podložky bylo mnohem pracnější a bylo potřeba vyvinout větší sílu.

Pro dobrou orientaci a přehled mezi jednotlivými vytištěnými modely byl použit centropen, který se používá na popis CD/DVD. Jakmile byl daný model hotov a odstraněn z vyhřívané podložky, ihned byl, z jeho spodní strany (první vrstvy modelu), popsán. Nápis obsahoval použitou trysku (mosaznou, titanovou nebo ocelovou), teplotu tisku (190 °C nebo 210 °C) a také číslo pořadí (1., 2. nebo 3.).

Po vytisknutí všech potřebných modelů s danou tryskou bylo potřeba ji vyměnit za další. Povolení a utažení jednotlivých trysek bylo provedeno plochými klíči velikosti 7 mm a 8 mm. V případě nouze by bylo možné použít i kombinační kleště, to by však mohlo zapříčinit znehodnocení trysky (mosazná tryska má relativně malou tvrdost). Výměna trysek byla provedena okamžitě po tisku, jakmile byl extruder ještě nahřátý, protože se v průběhu povolování trysky přídavný materiál snáze ukroutil a nebylo jej tedy třeba stříhat.

### **3.3 Tisk modelů**

V této podkapitole bude již popsán průběh tisku všech modelů. Pro zjištění toho, zda má nějaký vliv různorodnost materiálu trysky byl průběh tisku sledován a porovnáván, zdali bude vidět nějaká změna už při tištění modelů.

Před zahájením tisku prvního modelu bylo třeba tiskárnu zkalibrovat a položit na rovnou podložku, případně vymezit vůli, aby během tisku nedocházelo k velkému chvění celého rámu tiskárny. Kalibraci bylo nutno provést, protože byla tiskárna přesunuta na jiné místo.

Před tiskem každého modelu byla vyhřívaná podložka důkladně očištěna, proběhla kontrola nastavení výšky ústí trysky vůči vyhřívané podložce a také se nanasla tenká vrstva lepidla. V rámci zjištění toho, s jakou přesností program Cura Ultimaker 14.07 provedl odhad předpokládané doby tisku každého modelu, byl sledován skutečný čas tisku každého modelu. Vzhledem ke stejným tiskovým parametrům je výsledný předpokládaný čas tisku

identický pro všechny druhy (materiály) trysek. Na Obr. 15 lze vidět, že odhadovaný čas tisku je 91 minut. Na základě měření v průběhu tisku byly změřeny skutečné časy tisku jednotlivých modelů, které lze vidět v Tab. 1. Čas tisku byl měřen vždy od té chvíle, kdy došlo k nahrání vyhřívané podložky a extruderu 3D tiskárny na požadovanou hodnotu (vyjetí tiskové hlavy z referenční polohy) až do ukončení tisku zastavením tiskové hlavy. Z důvodu nestálé teploty v místnosti nebylo možno provést měření času tisku i s dobou trvání nahrívání extruderu 3D tiskárny. Lze však předpokládat, že by byl celkový čas odlišný, a to z důvodu rozdílných materiálů trysek.

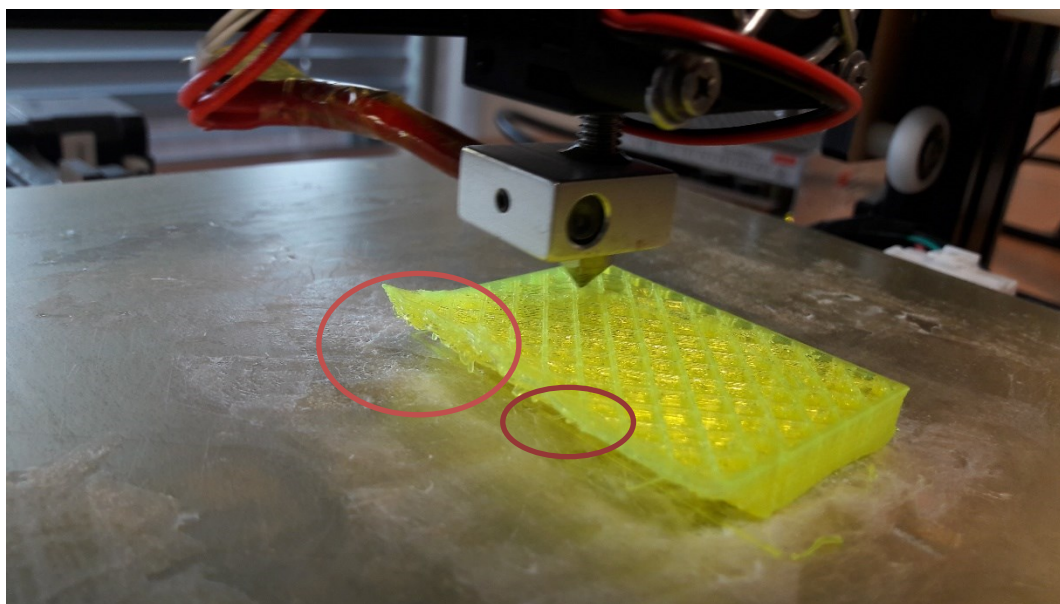
**Tab. 1** – Naměřené skutečné časy tisku jednotlivých modelů

Materiál trysky	Mosaz		Titan		Ocel	
Teplota extruderu 3D tiskárny [°C]	190	210	190	210	190	210
Naměřené skutečné časy tisku [min]	111	112	112	112	111	112
	110	111	112	111	111	111
	110	112	111	111	111	111

Z výše uvedené Tab. 1 vyplývá fakt, že materiál trysky nijak neovlivní čas tisku, protože maximální rozdíl mezi nejdelší a nejkratší dobou tisku je pouze dvě minuty. Tato malá odchylka nejspíše vznikla v důsledku nepřesnosti měření a nelze ji brát v potaz. Dále lze vidět, že odhadovaná doba tisku programem Cura Ultimaker 14.07 je podstatně kratší než skutečná a jedná se přibližně o 20 minut.

### 3.3.1 Vady v průběhu tisku

Kvalita tisku byla pozorována i v průběhu samotného tisku, protože má také vliv na konečný produkt. Vytisknutý model bude následně podroben měření, které jej bude hodnotit s ohledem na dosaženou rozměrovou přesnost. Tato kapitola je však konkrétně zaměřena na vzhled a porovnávání průběhu tisku v závislosti na materiálu trysky.



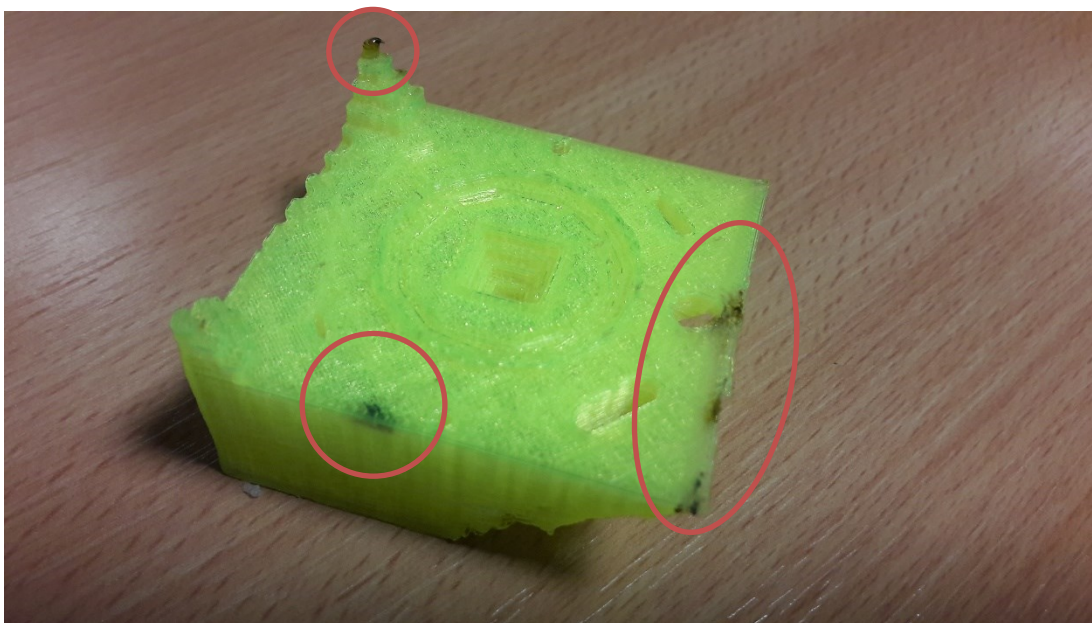
**Obr. 26** – Deformace modelu v průběhu tisku s použitím mosazné trysky

Na Obr. 26 je vidět deformace modelu v průběhu tisku u průchozí díry  $\varnothing 2$  mm. Tato vada se vyskytovala na každém modelu (bez ohledu na druh materiálu extruderu), rozdíl byl ale v její intenzitě. Na tomto obrázku je zachycen průběh tisku s mosaznou tryskou, která, na základě pozorování, vykazovala největší deformaci, naopak ocelová a titanová tryska neměla tak razantní vliv. Je třeba také zmínit to, že se tato vada nevyskytovala na druhé straně modelu, kde se nachází díra  $\varnothing 3$  mm. Deformace modelu není zapříčiněná špatným založením první vrstvy modelu, protože se chyba opakuje a při pozorování bylo možné vidět, že se deformace neobjevuje v první vrstvě. Důvod, proč je deformace větší při použití mosazné trysky, může být ve velké akumulaci tepla v tomto místě, to by se však vada vyskytovala i na druhé straně modelu, kde se nachází, vlivem větší díry, ještě méně materiálu. Příčina může být také v tom, že místo, kde se deformace nachází, je začátkem tisku první (základní) vrstvy. Tato vada se však v průběhu tisku zmenšovala až do té míry, že na konci tisku nebylo nijak poznat její přítomnost a povrch byl rovný<sup>13</sup>.

Následující vada, kterou lze také vidět na Obr. 26 je ukapávání přídavného materiálu, které se nejvíce projevilo na šikmé stěně modelu (úhel  $30^\circ$ ). Vlivem menšího množství materiálu, a tedy velkého vneseného tepla se okraj modelu mírně zvednul (deformoval) a v některých místech tryska pokládala vrstvu mimo model. Tento problém by bylo možné částečně odstranit použitím větší tloušťky skořepiny (*Shell thickness*), jak je vidět na Obr. 16. Okraj modelu by v takovém případě tvořilo více tiskového materiálu a zmenšilo by se tedy riziko deformace modelu. Zlepšila by se rovněž návaznost jednotlivých vrstev modelu, jak ukazuje Obr. 17, samozřejmě na úkor delší doby tisku. Další možností, jak vadu odstranit je pauza mezi tiskem jednotlivých vrstev (pokles teploty materiálu) nebo snížení teploty extruderu (*Printing temperature*). Zajímavé by také bylo použití jiné varianty vzoru výplně, jak je vidět na Obr. 18. Se zvyšujícím se úhlem mezi boční stěnou a

vyhřívanou podložkou se problém zmenšoval a na horní vrstvě již zcela zaniknul, protože se zde již nacházel větší úhel vůči vyhřívané podložce ( $50^\circ$ ) a kladený materiál měl lepší přidržnost než při úhlu  $30^\circ$  <sup>13</sup>.

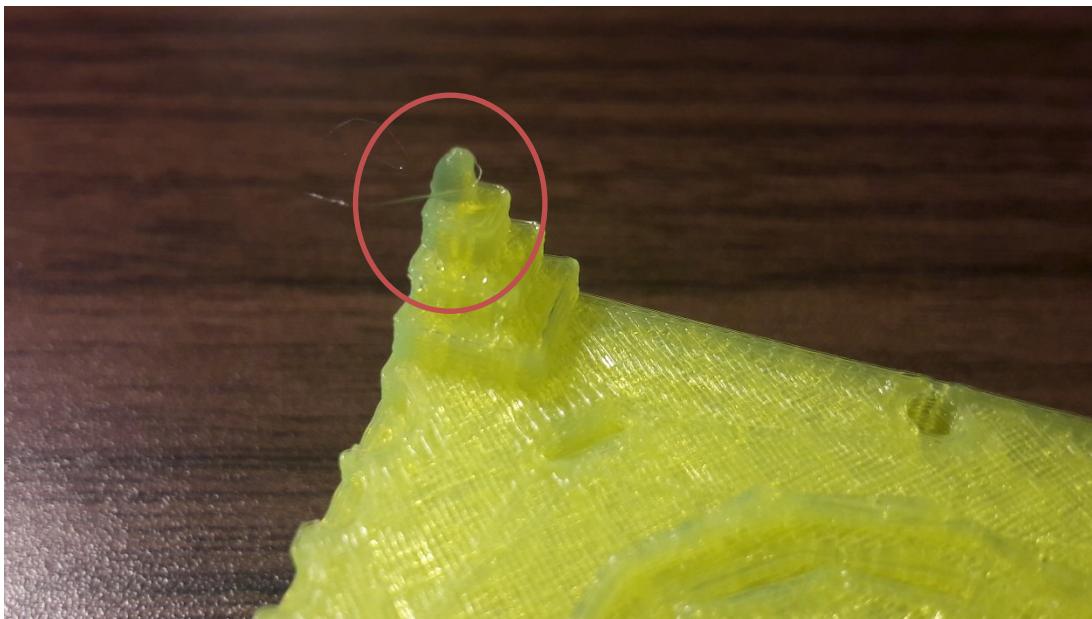
Další vadou, která v průběhu tisku nastala je vytečený přídavný materiál kolem závitů tiskové hlavy. Následky této chyby jsou vidět v podobě černých míst na Obr. 27. Příčinou vzniku těchto nahodilých a vzhledově nežádoucích jevů na modelu je mírné povolení tiskové hlavy, a tedy vznik netěsnosti, která měla za následek to, že malá část filamentu unikla horní stranou tiskové hlavy, stekla až na trysku a ulpěla na modelu, kde zanechala již zmiňovaná černá místa. Černá barva vznikla proto, že byl únik materiálu malý, a tedy trvalo delší dobu, než se materiál dostal mimo nahřátou tiskovou hlavu a došlo tedy k jeho spálení. Vzhledem k tomu, že tato vada nebyla nijak zapříčiněná materiálem trysky, ale jejím povolením v extruderu, nemá žádný vliv na výsledné hodnocení a její přítomnost nebude nijak brána v potaz <sup>13</sup>.



**Obr. 27** – Vliv vytečeného tiskového materiálu

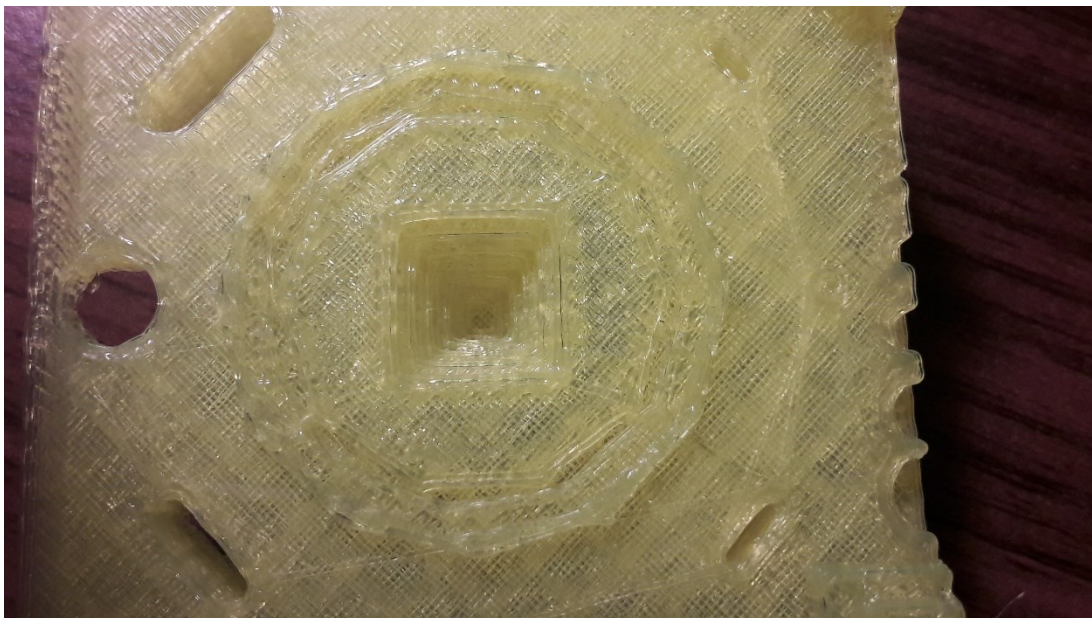
Následujícím nedostatkem, který vznikl při tisku všech modelů bylo přehřívání, a tedy následná deformace, posledního (nejmenšího) vyčnívajícího čtverce, jak lze vidět na Obr. 28. Příčinou vzniku této vady je bezpochyby menší možnost odvodu tepla z kladeného materiálu a následná tepelná deformace. Tento jev se na modelu vyskytnul i na druhé straně modelu u čtvrtkruhů. Možným opatřením by bylo např. použití delší přestávky mezi tiskem jednotlivých vrstev, ale pouze konkrétně u této části modelu. Bohužel tuto funkci tiskárna nenabízí a tisk celého modelu s většími časovými rozestupy mezi jednotlivými vrstvami by byl velice časově náročný. Rozdíly mezi teplotami extruderu ( $190^\circ\text{C}$  nebo  $210^\circ\text{C}$ ) nemají významný vliv na velikost tepelné deformace.





**Obr. 28** – Deformace modelu vlivem koncentrace tepla

Další viditelnou vadou při tisku je vzhled kruhových objektů. Detail vady je vidět na Obr. 29, kde si lze snadno všimnout nepravidelné kružnice (ø30 mm). Tato vada je rovněž zapříčiněná technickými možnostmi tiskárny Anet A2, která, jak se ukázalo hlavně při tvorbě útvarů větších průměrů, má značný problém s jejich tiskem. Tiskárna tedy nevytvořila kružnici ale n-úhelník. Tento problém se nejspíše vyskytnul i u menších průměrů na modelu, ale s výrazně menší intenzitou. Tato vada je neřešitelná (pouze změnou tiskárny nebo zvýšením počtu trojúhelníků v STL modelu), protože by ji nebylo možné vyřešit změnou parametrů tisku.



**Obr. 29** – Tisk kruhových útvarů na tiskárně Anet A2

## 4 Dílčí hodnocení dosažených výsledků

Poslední část tohoto experimentu bude zaměřena na výsledné hodnocení kvality tisku z hlediska vizuální kontroly, poté budou vypočteny nepřesnosti rozměrů, a nakonec opotřebení jednotlivých trysek, které byly použity při tisku. Na základě dosažených výsledků bude možno určit, zda je nějaký rozdíl ve kvalitě tisku za použití rozdílných materiálů trysek (mosaz, titan, ocel).

### 4.1 Vizuální hodnocení modelů

V první části hodnocení vytisknutých modelů byla provedena jejich vizuální kontrola. Vzhled je ve většině případů rozhodujícím kritériem, protože je to základní lidský vjem a člověk jej zaznamená rychleji než ostatní vedlejší věci (např. rozměrovou nepřesnost). Vizuální hodnocení bylo provedeno autorem a je proto možné, že každý pozorovatel bude mít trochu jiný názor na kvalitu modelů.

Vzhledem k tomu, že byly vytisknuty vždy tři modely za stejných tiskových parametrů, bude hodnocen každý jednotlivě, a nakonec se dosažené body zprůměrují pro každou skupinu. Hodnocení bude probíhat za pomoci dosažených bodů. Model, který získá 1 bod má v porovnání s ostatními lepší vzhled než ten, co získá 5 bodů. Je třeba rovněž zmínit fakt, že použitá tiskárna nepatří mezi špičku ve svém oboru, a proto budou modely hodnoceny porovnáváním mezi sebou čísly 1 až 5. První hodnocenou oblastí je šikmá část modelu (30°, 40° a 50°), která má velice nepříznivý tvar a její tisk byl nejnáročnější. Výsledky vizuální kontroly lze vidět v Tab. 2. Nejlepšího výsledku dosáhla ocelová tryska, která tiskla při teplotě 210 °C, naopak v porovnání s ní tiskla nejhůře mosazná a titanová tryska zahřátá na 190 °C.

Tab. 2 – Vizuální hodnocení kvality šikmé části modelu

-	-	Materiál trysky					
-	-	Mosaz		Titan		Ocel	
-	Teplota trysky [°C]	190	210	190	210	190	210
Bodové hodnocení kvality šikmé části modelu		3	3	4	2	4	3
		5	4	4	3	3	1
		3	3	3	3	2	1
Dosažené body		11	10	11	8	9	5
Pořadí		5./6.	4.	5./6.	2.	3.	1.

Následujícím vizuálně hodnoceným parametrem je kvalita první vrstvy modelu, a to především její rovinnost, která má vliv na další kladení vrstev modelu a odvíjí se od ní výsledná kvalita celého produktu. Povrch, který je kompaktní a tvoří pevný základ bez viditelných vad bude hodnocen 1 bodem, naopak deformovaný povrch, který není v porovnání tak rovný a lze na něm nalézt různé důlky nebo díry bude ohodnocen nejhůře, tedy 5 body. Výsledky hodnocení lze vidět v Tab. 3. Výsledky kvality první vrstvy modelu ukazují, že nejlépe vypadá povrch při použití mosazné trysky, poté ocelové a nejhoršího výsledku dosáhla tryska z titanu.

**Tab. 3** - Vizuální hodnocení kvality povrchu první vrstvy modelu

-	-	Materiál trysky					
-	-	Mosaz		Titan		Ocel	
-	Teplota trysky [°C]	190	210	190	210	190	210
Bodové hodnocení kvality povrchu první vrstvy modelu		1	2	4	4	2	3
		2	2	2	2	2	2
		2	1	3	2	3	2
Dosažené body		5	5	9	8	7	7
Pořadí		1./2.	1./2.	6.	5.	3./4.	3./4.

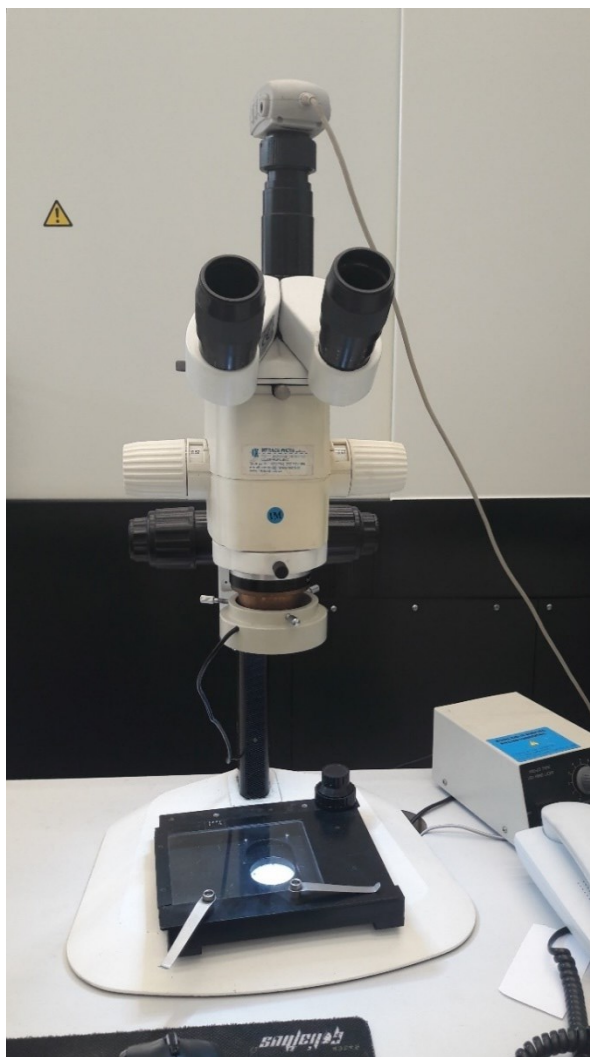
Posledním vizuálně hodnoceným parametrem modelů jsou přechody mezi hranami a množství přebytečného filamentu, který na výrobku zůstal a bude jej třeba odstranit ručně např. broušením. Opět platí, že 1 bod znamená kvalitní povrch modelu bez přebytečného přídavného materiálu a hrany na sebe dobře navazují. Model s 5 body vykazuje velké množství přebytečného materiálu a nesprávnou návaznost hran modelu, případně tvorbu dutin zapříčiněnou malým množstvím tiskového materiálu. Výsledky vizuálního hodnocení lze vidět v Tab. 4. Na první pohled je zřejmé, že extruder zahřátý na nižší teplotu (190 °C) vykazuje lepší kvalitu povrchu výsledného modelu než při 210 °C, kde materiál více ulpívá na výrobku a degraduje jeho vizuální vlastnosti.

**Tab. 4** - Vizuální hodnocení návaznosti hran a množství přebytečného filamentu ulpívajícího na hotovém modelu

-	-	Materiál trysky					
-	-	Mosaz		Titan		Ocel	
-	Teplota trysky [°C]	190	210	190	210	190	210
Bodové hodnocení návaznosti hran a množství přebytečného filamentu ulpívajícího na hotovém modelu		3	3	3	3	2	5
		3	4	2	3	3	4
		3	4	2	4	3	4
Dosažené body		9	11	7	10	8	14
Pořadí		3.	5.	1.	4.	2.	6.

## 4.2 Hodnocení rozměrové přesnosti tisku

Druhým hodnoceným parametrem je dosažená přesnost tisku za použití rozdílných materiálů trysek (mosaz, titan, ocel) při teplotě extruderu 190 °C a 210 °C. Měření probíhalo ručním digitálním posuvným měřítkem s přesností 0,01 mm a také mikroskopem INTRACO MICRO (viz Obr. 30), který byl použit při kontrole rozměrů obtížně měřitelných běžným posuvným měřítkem (rádiusy, menší rozměry atd.).



**Obr. 30** – Mikroskop INTRACO MICRO použitý při hodnocení kvality tisku

Pro správnost měření byly vždy naměřeny 3 hodnoty na každém modelu, výsledkem tedy bylo 9 hodnot ze tří vytisknutých výrobků za stejných podmínek. Tyto hodnoty byly zapisovány do programu Excel, s jehož pomocí se následně provedl výpočet pravděpodobně naměřené hodnoty.

Z naměřených dat byl nejdříve vypočítán aritmetický (výběrový) průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \text{ [mm]}, \quad (1)$$

kde jsou  $\bar{x}$  – výběrový průměr [mm],

$n$  – počet naměřených hodnot [–],

$x_i$  –  $i$ -tá hodnota [–],

$i$  –  $i$ -tý člen [–] <sup>34</sup>.

Po dosazení hodnot získaných měření vnitřního čtverce 4 mm tisknutým mosaznou tryskou při teplotě extruderu 190 °C platí:

$$\bar{x} = \frac{1}{9} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{9} \cdot (4 + 3,96 + 3,83 + 3,99 + 3,9 + 3,97 + 3,98 + 3,92 + 3,94) \cong \\ \cong 3,94 \text{ mm.}$$

Následně byl proveden výpočet výběrové směrodatné odchylky podle vztahu:

$$S_{(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \text{ [mm]}, \quad (2)$$

kde jsou  $S_{(x)}$  – výběrová směrodatná odchylka [mm],

$\bar{x}$  – výběrový průměr [mm],

$x_i$  – i-tá hodnota [–],

$n$  – počet naměřených hodnot [–],

$i$  – i-tý člen [–] <sup>34</sup>.

Po dosazení hodnot získaných měření vnitřního čtverce 4 mm tisknutým mosaznou tryskou při teplotě extruderu 190 °C tedy platí vztah:

$$S_{(x)} = \sqrt{\frac{(4 - 3,94)^2 + (3,96 - 3,94)^2 + (3,83 - 3,94)^2 + \\ (3,99 - 3,94)^2 + (3,9 - 3,94)^2 + (3,97 - 3,94)^2 + \\ (3,98 - 3,94)^2 + (3,92 - 3,94)^2 + (3,94 - 3,94)^2}{9 - 1}} \cong 0,05 \text{ mm.}$$

Dále byl proveden výpočet směrodatné odchylky rozptylu dílčích aritmetických průměrů podle vztahu:

$$S_{(\bar{x})} = u_A = \frac{S_{(x)}}{\sqrt{n}} \text{ [mm]}, \quad (3)$$

kde jsou  $S_{(\bar{x})}$  – směrodatná odchylka rozptylu dílčích aritmetických průměrů [mm],

$S_{(x)}$  – výběrová směrodatná odchylka [mm],

$n$  – počet naměřených hodnot [–] <sup>34</sup>.

Po dosazení hodnot získaných měření vnitřního čtverce 4 mm tisknutým prostřednictvím mosazné trysky při teplotě extruderu 190 °C tedy platí:

$$S_{(\bar{x})} = \frac{0,05}{\sqrt{9}} \cong 0,02 \text{ mm.}$$



Posledním vypočítaným parametrem byla náhodná chyba pro zvolenou pravděpodobnost:

$$U = k \cdot u_A \text{ [mm]}, \quad (4)$$

kde jsou  $U$  – náhodná chyba [mm],

$u_A$  – směrodatná odchylka rozptylu dílčích aritmetických průměrů [mm],

$k$  – koeficient  $[-]$  <sup>34</sup>.

Hodnota  $k$  byla určena pro zvolenou pravděpodobnost 95 %, která se ve strojírenství používá nejčastěji. Velikost koeficientu  $k$  při počtu měření 9 ( $n=9$ ) je tedy 2,306.

Po dosazení vypočítaných parametrů pro vnitřní čtverec 4 mm tištěným tryskou z mosazi tedy platí:

$$U = 2,306 \cdot 0,02 \cong 0,04 \text{ mm.}$$

Pravděpodobně naměřená velikost vnitřního čtverce 4 mm tisknutá mosaznou tryskou je tedy  $(3,94 \pm 0,04)$  mm. V Tab. 5 jsou zaznamenány všechny pravděpodobně naměřené hodnoty tisknutých modelů. Jejich umístění na modelu lze pak vidět na výkrese (červené kóty), který je součástí přílohy A.

Hodnocení přesnosti tisku jednotlivých trysek mezi sebou bylo prováděno tak, že se z intervalu pravděpodobně naměřených hodnot vybrala ta nejvzdálenější od jmenovitého rozměru a poté se jednotlivým výsledkům přiřadila čísla (body) od 1 do 6 tím způsobem, že číslo 1 má nejmenší vzdálenost od jmenovitého rozměru (nejpřesnější výsledek) a číslo 6 poukazuje na nejméně přesný výrobek. Jako příklad uvádím hodnocení tisku vnitřního čtverce 4 mm (viz Tab. 5). Výrobek s číslem 1 (nejpřesnější) byl vytisknut ve stejné kvalitě za použití mosazné trysky při teplotě extruderu 210 °C a také při tisku ocelovou tryskou za teploty extruderu 190 °C. Obě pravděpodobně nejvzdálenější hodnoty mají velikost 3,91 mm, a proto se dělí o 1. místo, tudíž mají každá 1,5 bodu. Tímto způsobem jsem provedl výpočet i zbylých kategorií, přiřadil body a sečetl je. Výsledkem je 6 čísel, která jsou vidět v Tab. 6.

Tab. 5 – Pravděpodobně naměřené hodnoty hodnocených rozměrů na modelech

-		Materiál trysky					
-		Mosaz		Titan		Ocel	
Teplota trysky [°C]		190	210	190	210	190	210
Měřená hodnota [mm]	Vnitřní čtverec 4	3,94±0,04	3,96±0,05	3,87±0,04	3,91±0,04	3,96±0,05	3,89±0,05
	Vnitřní čtverec 6	5,95±0,06	5,95±0,03	5,84±0,03	5,98±0,05	6,02±0,03	5,97±0,04
	Vnitřní čtverec 10	9,91±0,06	9,90±0,03	9,86±0,04	9,88±0,06	9,94±0,04	9,90±0,04
	Vnější čtverec 4	4,01±0,03	3,96±0,05	3,97±0,03	3,88±0,01	3,95±0,01	3,95±0,04
	Vnější čtverec 6	5,98±0,01	5,92±0,03	5,89±0,03	5,92±0,02	5,90±0,02	5,91±0,02
	Vnější čtverec 8	8,02±0,01	7,93±0,04	8,03±0,03	8,04±0,02	7,97±0,03	8,05±0,04
	Délka drážky 4	3,75±0,05	3,77±0,03	3,73±0,08	3,69±0,09	3,65±0,04	3,72±0,03
	Šířka drážky 1	1,25±0,02	1,21±0,02	1,16±0,02	1,16±0,05	1,23±0,04	1,21±0,04
	Délka drážky 8	7,62±0,02	7,55±0,05	7,47±0,02	7,52±0,02	7,50±0,02	7,52±0,01
	Šířka drážky 2	2,07±0,03	2,03±0,02	1,99±0,04	1,98±0,03	2,07±0,04	2,08±0,03
	Průměr 30	29,28±0,06	29,21±0,07	29,33±0,04	29,34±0,05	29,21±0,1	29,23±0,06
	Průměr 2	1,92±0,04	1,90±0,06	1,77±0,05	1,84±0,06	1,86±0,04	1,86±0,05
	Radius 2,5	2,25±0,02	2,25±0,02	2,21±0,03	2,24±0,04	2,27±0,03	2,22±0,02
	Radius 1,5	1,23±0,03	1,27±0,03	1,26±0,02	1,27±0,03	1,24±0,03	1,28±0,02
	Radius 8	7,81±0,08	7,57±0,1	7,60±0,12	7,60±0,1	7,59±0,11	7,53±0,12

Nejlepší výsledek zaznamenala mosazná tryska, jejíž výsledky měření se umístily na 1. místě při 190 °C extruderu a na 2. místě při 210 °C extruderu. O 3. a 4. místo v pořadí se dělí titanová tryska při 210 °C extruderu s ocelovou při 190 °C extruderu. Ocelová tryska nahřátá na 210 °C se umístila na 5. místě a nejhoršího výsledku dosáhla titanová tryska při 190 °C extruderu.

**Tab. 6** – Vyhodnocení přesnosti tisku modelů

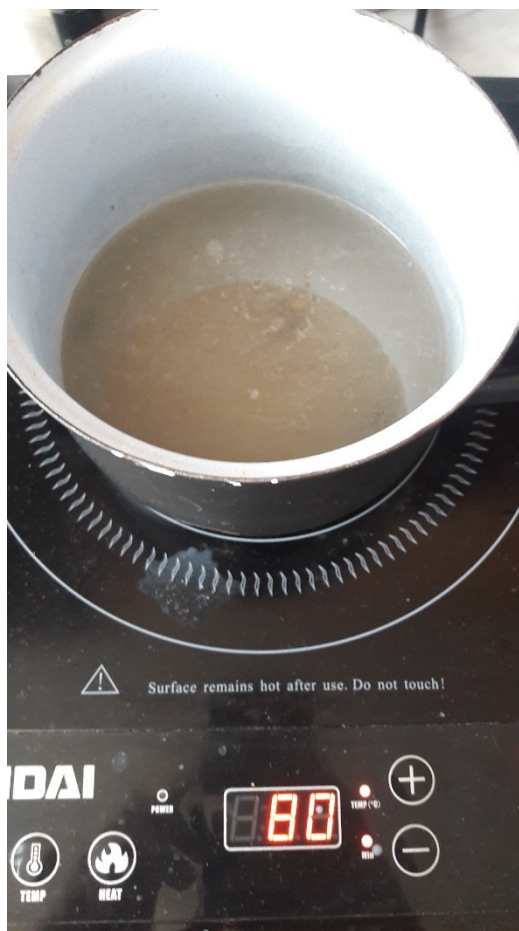
-	Materiál trysky					
-	Mosaz		Titan		Ocel	
Teplota trysky [°C]	190	210	190	210	190	210
Dasažené body	41	47,5	63	52,5	52,5	58,5
Pořadí	1.	2.	6.	3./4.	3./4.	5.

### 4.3 Měření opotřebení trysek po tisku

Na základě toho, že na kvalitu tisku má také do jisté míry vliv opotřebení trysky, bylo provedeno měření průměru trysek po vytištění modelů. Toto měření probíhalo rovněž na mikroskopu INTRACO MICRO (viz Obr. 30). Z dostupných zdrojů je již známo, že mosazná tryska je méně otěruvzdorná a její spotřeba (úbytek materiálu během tisku) je tedy větší, jak lze vidět na Obr. 23.

Před samotným měřením trysek však bylo potřeba provést jejich vyčištění od zbylého filamentu, který v nich pevně ulpěl. Na základě konzultace s vedoucím bakalářské práce bylo zvoleno vhodné rozpouštědlo. Jako nejlepší vhodný přípravek byl vybrán hydroxid sodný (NaOH), který by podle dostupných zdrojů měl reagovat s použitým materiálem PLA-T a postupně jej odplavit. Toto rozpouštědlo se také často používá při tisku z materiálu ABS, kdy je jako sekundární materiál použit PLA, kterým jsou zhotoveny podpěry modelu. Po vytisknutí se pouze model s podpěrami vloží do lázně s hydroxidem sodným (zahřátým na 60 °C) na několik hodin a PLA materiál se postupně odplaví, bez toho, aniž by se nějakým způsobem degradoval materiál ABS. Lázeň se zahřívá proto, aby se reakce urychlila, protože odplavování ve studené vodě s hydroxidem sodným by trvalo příliš dlouho (několik týdnů) <sup>14</sup>.

Proces čištění trysek od tiskového materiálu probíhal ve vodě o 80 °C, ve které byl rozpuštěn hydroxid sodný podle návodu výrobce. Výhodou použití této látky je rovněž ta skutečnost, že se nejedná o hořlavinu, a relativně dobře se s ní tedy zachází. Na druhou stranu jedná se o žíravinu a zdraví škodlivou látku, bylo tedy zapotřebí při manipulaci s tryskami používat ochranné rukavice. Proces odplavování lze vidět na Obr. 31, kde je také možné si povšimnout zakalené vody, ve které se PLA-T materiál odplavoval. Po vizuální kontrole však bylo zjištěno, že trysky ještě nejsou zcela čisté, proto byla provedena výměna vody za čistou s NaOH a čištění se opakovalo znovu. V rámci urychlení procesu byl zbylý materiál (ještě za nahřátého stavu) odstaněn tlakem vzduchu a poté se ještě s cílem dokonalého odstanění zbytků tiskového materiálu provedl poslední kratší proces odplavování.



**Obr. 31** – Odplavování materiálu PLA-T z použitých trysek

Na základě měření trysek prostřednictvím mikroskopu INTRACO MICRO bylo naměřeno 10 hodnot (průměrů) z každé trysky. Poté byl proveden výpočet v programu Excel podobným způsobem jako u hodnocení rozměrové přesnosti tisku (viz kap. 4.2). Konečné pravděpodobně naměřené hodnoty průměrů trysek je vidět v Tab. 7.

**Tab. 7** – Pravděpodobně naměřené hodnoty průměrů trysek po vytisknutí modelů

Materiál trysky	Mosaz	Titan	Ocel
Pravděpodobně naměřená hodnota [mm]	0,414±0,007	0,394±0,007	0,406±0,007

Z výše uvedené tabulky je zřejmé, že největší úbytek materiálu nastal při použití mosazné trysky, naopak nejlepší otěruvzdornost byla zaznamenána na trysce z titanu. Ocelová tryska vykazovala v porovnání s ostatními střední poškození.

## 5 Závěr

Účelem této bakalářské práce bylo zjistit, zda má nějaký vliv na kvalitu tisku materiál, ze kterého jsou vytvořeny trysky upevněny v extruderu 3D tiskárny. Vzhledem k novým konkurenčním technologiím bylo potřeba zjistit, zda-li lze zvyšovat výslednou kvalitu výrobku, jak po stránce vizuální, tak i rozměrové, změnou materiálu trysek.

Na začátku bylo potřeba zvolit vhodnou tiskárnu, na které bude tisk probíhat. Na základě rozhodování mezi třemi možnými tiskárnami byla zvolena Anet A2. Použily se tři druhy trysek (mosazná, ocelová a titanová). Po vytvoření vhodného modelu, na kterém lze provést rozměrové i vizuální hodnocení byla tiskárna seřízena a provedlo se nastavení tisku. Následně byly všechny modely vytisknuty v co nejkratším čase pro dodržení stejných tiskových podmínek.

V další části bylo prováděno hodnocení vytisknutých modelů a rovněž měření opotřebení trysek.

Vizuální hodnocení bylo rozděleno na tři části, které byly pozorovány. První z nich byla kvalita vytištěné šikmé plochy modelů (viz Tab. 2). Na základě mého vizuálního hodnocení, které je individuální a nemusí se tedy nutně shodovat s hodnocením jiného člověka, bylo provedeno známkování. Ocelová tryska nahřátá na 210 °C dosáhla nejlepšího hodnocení, další byla titanová se stejnou teplotou a na třetím místě opět tryska z oceli, která tiskla při 190 °C. Vizuálně nejhorší šikmá plocha byla vyhodnocena po tisku mosaznou a titanovou tryskou při 190 °C extruderu. V hodnocení vizuální kvality první vrstvy modelu nejlépe vypadal povrch po tisku mosaznou tryskou a nejhůře titanovou (viz Tab. 3). Třetí vizuální hodnocení se týkalo návaznosti hran modelů a také množství přebytečného ulpívajícího filamentu, který na výrobku zůstal a musel by být následně odstraněn např. broušením. V Tab. 4 je vidět, že v každém případě při použití vyšší teploty tisku je množství zbytků plastu na modelu větší. Příčinou je zcela nepochybně vyšší teplota tisku, která přidavný materiál více nataví a ten má tedy větší snahu ukapávat a ulpívat na výrobku.

Vyhodnocená data s pravděpodobně naměřenými hodnotami lze vidět v Tab. 5. Výsledky jsou v Tab. 6, která rovněž poukazuje na to, že nejpresnější modely byly vytisknuty za pomoci mosazné tryšky při 190 °C extruderu. Naopak titanová tryska se stejnou teplotou tryšky zaznamenala nejhorší výsledek, co se týče rozměrové přesnosti vytisknutých modelů.

Posledním hodnoceným parametrem bylo opotřebení trysek po tisku, které má rovněž velký význam při výběru a rozhodování před tiskem. Na základě dat neměřených na mikroskopu INTRACO MICRO byly vypočítány pravděpodobně naměřené hodnoty průměrů trysek (viz Tab. 7). Výsledkem těchto dat je nejmenší opotřebení titanové tryšky, střední ocelové a nejmeně otěruvzdorná je tryska z mosazi.



## **6 Poděkování**

Děkuji tímto vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a odbornou pomoc při tvorbě bakalářské práce. Děkuji rovněž své rodině a přátelům za podporu během studia na vysoké škole.

## 7 Seznam použitých zdrojů

- [1] PAGÁČ, Marek. Jak připravit kvalitní a přesný model pro 3D tisk [online]. 3. 6. 2015 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.mujsolidworks.cz/jak-pripravit-kvalitni-a-presny-model-pro-3d-tisk/>
- [2] ZUZA, Mikolas. Vše o tryskách s různým průměrem [online]. 29. 05. 2018 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem/>
- [3] CÍSAŘ, Dominik. K čemu slouží nastavení perimeters? [online]. 18. 12. 2015 [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters/>
- [4] Filament2print: Retraction in 3d printing [online]. 8/2018 [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: [https://filament2print.com/gb/blog/34\\_retraction-in-3d-printing.html](https://filament2print.com/gb/blog/34_retraction-in-3d-printing.html)
- [5] Ultimaker: Ultimaker Cura 3 [online]. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/52343-shell>
- [6] Ultimaker: Infill [online]. [cit. 2020-01-31]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/20416-infill>
- [7] Ultimaker: Speed [online]. [cit. 2020-01-31]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/52664-speed>
- [8] LOWRY, Steve. Gearbest: 3D printer grinding filament solution [online]. 2018-09-07 [cit. 2020-01-31]. Dostupné z: <https://www.gearbest.com/blog/how-to/3d-printer-grinding-filament-solution-2924>
- [9] Cashmeral: T-PLA filament for 3D printer [online]. [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <http://www.cashmeral.com/product/showproduct.php?lang=en&id=39>
- [10] MOC, PAVEL. VLIV TEPLoty PODLOŽKY 3D TISKÁRNY NA KVALITU TISKU [online]. 19/5/2015 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16591/1/Moc.pdf>
- [11] KOVÁČIK, Miroslav. 3dfactory [online]. 1.1.2017 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/01/01/priprava-pred-3d-tiskem/>
- [12] VOCHOMŮRKA, Jan. Openinnovations: Typy trysek [online]. Srp 14, 2017 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: <https://www.openinnovations.cz/blog/2017/08/typy-trysek/>
- [13] Levne3dtiskarny: Chyby při 3D tisku [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.levne3dtiskarny.cz/cs/content/7-chyby-pri-3d-tisku>
- [14] 3dzona: TISKOVÉ MATERIÁLY [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.3dzona.cz/cs/tiskove-materialy>

- [15] TOMAS. Sharplayers: Základní principy aditivní výroby [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.sharplayers.cz/support/aditivni-vyroba/>
- [16] STRÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. Základy 3D tisku s Josefem Průšou: Historie 3D tisku [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-03-12].
- [17] KOVÁČIK, Miroslav. 3dfactory: Historie 3D tisku [online]. 27.10.2017 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [18] BALLISTIC PARTICLE MANUFACTURING (BPM) [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://256.makerslocal.org/wiki/images/6/6c/BPM.pdf>
- [19] Pkmodel: Hrátky se světlem Světelný informační systém Účast na veletrzích Technologie 3D printer Poptávka výroby modelů Vizualizace, animace Technologie 3D tisku [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3Dtisk.html>
- [20] VACULÍK, Martin. Rapid prototyping: Laminated Object Manufacturing (LOM) – vrstvená výroba. Zlín, 2011, 63 s. Dostupné také z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16106/vacul%C3%ADk\\_2011\\_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16106/vacul%C3%ADk_2011_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Michal Staněk.
- [21] Dkmp: Přehled technologií 3D tisku [online]. 09.01.2018 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [22] MOŠTĚK, Martin. Návrh metodiky pro výrobu ortéz pro zlomeniny pomocí rapid prototyping: SYSTÉMY ADITIVNÍ VÝROBY. Zlín, 2019, 94 s. Dostupné také z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/45286/mo%20t%20k\\_2019\\_dp.pdf?sequence=1](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/45286/mo%20t%20k_2019_dp.pdf?sequence=1). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Michal Staněk.
- [23] Materialpro3d: FFF/FDM technologie [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/fff-fdm-technologie/>
- [24] Abc3d: 3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
- [25] Materialpro3d: ABS [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [26] KADLEC, Martin. Mk-eshop: Přehled materiálů pro 3D tisk [online]. Mar 15, 2019 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk#>
- [27] Materialpro3d: PC [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pc/>

- [28]Materialpro3d: Nylon (PA) [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>
- [29]Materialpro3d: PLA [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
- [30]REDAKCE SHW. Svethardware: 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? [online]. 21.2.2019 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [31]Trilab3d: TRILAB DeltiQ [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/deltiq/>
- [32]ADLUGHMIN. 3dprint: Polar 3D Launches Unique Polar Coordinate-Based FFF 3D Printer at CES 2015 [online]. January 7, 2015 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://3dprint.com/35656/polar-3d-printer-ces-2015/>
- [33]Hackaday: RepRap HELIOS [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/21355-reprap-helios>
- [34]PETŘKOVSKÁ, Lenka. TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE - V PŘÍKLADECH: Náhodné chyby [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_026/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech%2003%20Z%C3%A1kladn%C3%AD%20vyhodnocov%C3%A1n%C3%AD%20v%C3%BDsledk%C5%AF%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_026/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech%2003%20Z%C3%A1kladn%C3%AD%20vyhodnocov%C3%A1n%C3%AD%20v%C3%BDsledk%C5%AF%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD.pdf)

## 8 Seznam obrázků

Obr. 1 – Princip tisku metodou SLA <sup>22</sup> .....	11
Obr. 2 – Princip tisku metodou LOM <sup>20</sup> .....	12
Obr. 3 – Princip tisku metodou SLS <sup>20</sup> .....	12
Obr. 4 – Princip tisku metodou DMLS <sup>21</sup> .....	13
Obr. 5 – Princip tisku metodou SHS <sup>21</sup> .....	14
Obr. 6 – Princip tisku metodou BJ <sup>21</sup> .....	14
Obr. 7 – Princip tisku metodou DLP <sup>21</sup> .....	15
Obr. 8 – Princip tisku metodou FDM <sup>21</sup> .....	16
Obr. 9 – Ukázka 3D tiskárny FDM s kartézským ovládacím systémem <sup>30</sup> .....	17
Obr. 10 - Ukázka 3D tiskárny FDM s ovládacím systémem Core XY <sup>30</sup> .....	18
Obr. 11 - Ukázka 3D tiskárny FDM s ovládacím systémem Delta <sup>31</sup> .....	19
Obr. 12 - Ukázka 3D tiskárny FDM s ovládáním Polar <sup>32</sup> .....	20
Obr. 13 - Ukázka 3D tiskárny FDM s ovládáním Scara <sup>33</sup> .....	21
Obr. 14 – Nastavení základních parametrů tiskárny při instalaci programu na přípravu před 3D tiskem.....	26
Obr. 15 – Uživatelské prostředí programu Cura Ultimaker 14.07 a ukázka základního nastavení při tisku .....	27
Obr. 16 – Odlišné tloušťky skořepiny modelu <sup>3</sup> .....	28
Obr. 17 – Vliv počtu krajních vrstev na jejich tvorbu a návaznost <sup>3</sup> .....	28
Obr. 18 – Vzory výplně modelu podle použité hustoty <sup>6</sup> .....	29
Obr. 19 – Ukázka odborného nastavení při tisku v programu Cura Ultimaker 14.07 .....	30
Obr. 20 – Ukázka pokročilého nastavení při tisku v programu Cura Ultimaker 14.07 .....	31
Obr. 21 – Degradace filamentu způsobena vysokou rychlostí retrakce <sup>8</sup> .....	32
Obr. 22 – Použité trysky při tisku a jejich rozměry .....	34
Obr. 23 – Porovnání opotřebení mosazné (vlevo) a ocelové (vpravo) trysky <sup>12</sup> .....	34
Obr. 24 – Tiskárna Anet A2.....	35
Obr. 25 – Pracovní pomůcky použité při 3D tisku na tiskárně Anet A2 .....	36
Obr. 26 – Deformace modelu v průběhu tisku s použitím mosazné trysky.....	39
Obr. 27 – Vliv vytečeného tiskového materiálu .....	40
Obr. 28 – Deformace modelu vlivem koncentrace tepla .....	41

Obr. 29 – Tisk kruhových útvarů na tiskárně Anet A2.....	41
Obr. 30 – Mikroskop INTRACO MICRO použitý při hodnocení kvality tisku.....	45
Obr. 31 – Odplavování materiálu PLA-T z použitých trysek.....	50



## **9 Seznam příloh**

**Příloha A      Schody**